

Involucri trasparenti innovativi.
Modellazione e sperimentazione su componenti dinamici

Original

Involucri trasparenti innovativi. Modellazione e sperimentazione su componenti dinamici e sistemi di facciata attivi / Bianco, Lorenza. - (2014). [10.6092/polito/porto/2548139]

Availability:

This version is available at: 11583/2548139 since:

Publisher:

Politecnico di Torino

Published

DOI:10.6092/polito/porto/2548139

Terms of use:

Altro tipo di accesso

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

ITAC

Innovazione Tecnologica per l'Ambiente Costruito

\\ Tesi di dottorato di ricerca

Involucri trasparenti innovativi

Modellazione e sperimentazione su componenti dinamici e sistemi di facciata attivi

Lorenza Bianco

\\ Politecnico di Torino



Politecnico di Torino

Tesi di dottorato di ricerca

Innovazione Tecnologica per l'Ambiente Costruito

ITAC

Involucri trasparenti innovativi.
Modellazione e sperimentazione su componenti dinamici
e sistemi di facciata attivi

Candidata: arch. Lorenza Bianco

Relatori: prof. Valentina Serra
prof. Marco Perino

Ciclo XXVI

Maggio 2014

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Obiettivi e metodi della ricerca	5
2	L'evoluzione legislativa e tecnologica dell'involucro edilizio	7
2.1	Il quadro normativo di riferimento	7
2.2	L'involucro edilizio: da passivo ad attivo	8
2.2.1	Componenti di involucro edilizio passivo opaco	10
2.2.2	Componenti di involucro edilizio passivo trasparente	12
2.2.3	Sistemi di involucro edilizio passivi avanzati	14
2.2.4	Componenti di involucro edilizio dinamici	15
2.2.5	Sistemi di involucro edilizio dinamici integrati	16
2.2.6	Le facciate intelligenti, multimediali, bio-attive e responsive	16
2.2.7	Le facciate attive trasparenti	19
3	I parametri prestazionali per la valutazione energetica e del comfort indoor	25
3.1	Caratterizzazione energetica	25
3.1.1	I parametri per la valutazione energetica	25
3.1.2	Esempi di applicazione dei parametri per la valutazione energetica	28
3.2	Caratterizzazione acustica	30
3.2.1	Esempi di caratterizzazione acustica	31
3.3	Caratterizzazione luminosa	31
3.3.1	Esempi di caratterizzazione luminosa	32
3.4	Indici di valutazione del comfort ambientale	32
4	Modelli di calcolo	39
4.1	Modelli per componenti di facciata trasparenti	39
4.2	Modelli per sistemi di facciata trasparenti	43
4.2.1	Modelli semplificati	43
4.2.2	Modelli avanzati	48
5	Il monitoraggio in campo	53
5.1	La metodologia di misura sperimentale	53
5.1.1	Misure di prestazione termica in campo	54
5.1.2	Misure di prestazione acustica in campo	63
5.1.3	Misure di prestazione luminosa in campo	67
5.1.4	Misura di portata con gas traccianti ad emissioni costante	69

6	Elaborazione dei dati sperimentali e proposta di nuovi indicatori prestazionali	71
6.1	I parametri per la valutazione energetica	71
6.1.1	Flussi termici ed energie	71
6.1.2	I parametri prestazionali sintetici	73
6.1.3	Valutazione dei parametri prestazionali tradizionali	78
6.2	Valutazione delle prestazioni acustiche	82
6.3	Valutazione delle prestazioni luminose	82
6.4	Valutazione del comfort ambientale	83
7	Modello orario, semplificato per l'analisi energetica di sistemi di facciata trasparenti attivi	87
7.1	Descrizione del modello	87
7.2	Le equazioni di bilancio termico	90
7.2.1	Lo scambio termico short-wave	91
7.2.2	Lo scambio termico long-wave	97
7.2.3	Le equazioni di bilancio sui nodi	104
8	I casi studio	107
8.1	I componenti di involucro trasparente dinamici	109
8.1.1	I concepts del progetto Smartglass	109
8.1.2	CS1-Vetrocamera con PCM granulare	112
8.1.3	CS2-Triplovetrocamera con integrazione di materiale a cambiamento di fase e termotropico	114
8.2	I sistemi di facciata attiva	119
8.2.1	CSa-La facciata climatica Teyla	119
8.2.2	CSb-La facciata climatica Somec	121
8.2.3	CSb-La facciata climatica Coopsette	125
9	I risultati della sperimentazione	127
9.1	CS1-Vetrocamera con PCM granulare	127
9.1.1	CS1- Caratterizzazione energetica	128
9.2	CS2-Triplo vetrocamera con integrazione di materiale a cambiamento di fase e termotropico	130
9.2.1	CS2- Caratterizzazione luminosa	130
9.2.2	CS2- Caratterizzazione energetica	135
9.3	CSb-La facciata climatica Somec	145
9.3.1	CSb- Caratterizzazione luminosa	145
9.3.2	CSb- Caratterizzazione energetica	145
9.3.3	CSb- Valutazione dei parametri prestazionali tradizionali	153
9.3.4	CSb- Valutazione del comfort ambientale	162
9.4	CSb-La facciata climatica Coopsette	167
10	Applicazione e validazione del modello di calcolo proposto	169
10.1	La validazione del modello con dati sperimentali	169
10.2	Confronto tra i risultati del modello semplificato e di un modello avanzato	178

11 Conclusioni	183
11.1 I principali risultati della ricerca	183
11.2 Prospettive e sviluppi futuri della ricerca	185
Appendici	187
Parametri statistici per la valutazione delle simulazioni	189
La radiazione solare	193

Ringraziamenti

Ringrazio i miei relatori prof. Valentina Serra e prof. Marco Perino per il costante sostegno durante il periodo del dottorato e per avermi dato l'opportunità di collaborare in rilevanti progetti di ricerca divenuti parte integrante del mio lavoro di tesi. A loro va la mia gratitudine per avermi trasmesso una solida metodologia di ricerca, dettata da un'autentica passione nei confronti della loro professione che si rispecchia nello spirito del gruppo di lavoro.

Ringrazio il gruppo di ricerca TEBE, i prof. Vincenzo Corrado, Valerio L.M. Lovero per il lavoro svolto assieme.

Un particolare ringraziamento va a Francesco Goia, Ylenia Cascone, Fabio Zanghirella e Alice Gorrino con cui ho lavorato sui temi della tesi di dottorato e condiviso ricerche, dubbi, momenti di lavoro e amicizia.

Grazie ad Alfonso Capozzoli per avermi consigliato e ascoltato durante l'impostazione del lavoro di tesi.

Ringrazio tutti i colleghi che hanno condiviso con me questo percorso: Ilaria, Fabio F., Silvia, Gianluca, Amos, Stefano, Simona, Sabrina, Louena, Sara, Elena e Tomas.

Grazie ai tecnici del laboratorio per il supporto nell'attività sperimentale e informatica.

Acronimi

AIF	Advanced Integrated Façade
ATF	Active Transparent Façade
CEN	European Committee for Standardization
CF	Climate Façade
CS1	Caso Studio 1, vetrocamera con PCM granulare
CS2	Caso Studio 2, triplovetrocamera con TT
CSa	Caso Studio a, la facciata climatica Teleya
CSb	Caso Studio b, la facciata climatica Somec
CSc	Caso Studio c, la facciata climatica Coopsette
CTI	Comitato Termotecnico Italiano
CV	Canale Virtuale
DA	Daylight Autonomy
DF	Daylight Factor
DGI	Discomfort Glare Index
DGP	Daylight Glare Probabilità
DGU	Double Glazing Unit
DSF	Double Skin Façade
DR	Draft Risk
EBC	Energy in Buildings and Communities
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
FLD	Fattore di luce diurna
FTA	Facciate Trasparenti Attive
GFP	Gas Filled Panel
HF	Heat Flux
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
MATS	Modelling Active Transparent System
NZEB	Nearly Zero Energy Building
NIR	Near-infrared
PCM	Phase Change Material
PMV	Predicted Mean Vote
PMV*	Predicted Mean Vote con radiazione solare trasmessa

PPD Predicted Percentage of Dissatisfied
REQMP Radice Quadrata dell'Errore Quadratico Medio Percentuale
REQM Radice Quadrata dell'Errore Quadratico Medio
RBE Responsive Building Elements
RL Regressione Lineare
RLM Regressione Lineare Multipla
SIM Super Insulating Material
STD Standard Deviation
TGU Triple Glazing Unit
TIM Transparent Insulating Material
TM Sistemi ad attivazione di massa termica
TT Termotropico
TWINS Testing Window INnovative System
UDI Useful Daylight Illuminances
VIP Vacuum Insulation Panels

Nomenclatura

btr^*	Fattore correttivo	[-]
C	Concentrazione	[ppm]
c_p	Calore specifico	[J/kg°C]
CF	Capacità termica frontale	[kJ/m ² K]
d	Spessore dei nodi	[m]
D	Isolamento acustico	[dB]
E	Illuminamento	[lux]
E_{24}	Energia giornaliera	[Wh/m ²]
E_{tot24}	Energia totale giornaliera	[Wh/m ²]
E_n	Energia normalizzata	[Wh/m ²]
EE	Spessore intercapedini	[m]
EC_{nn}	Spessore tra i nodi	[m]
f_a	Fattore di attenuazione	[-]
F_ϵ	Fattore di vista	[-]
$g/TSET$	Fattore solare	[-]
g^*	Fattore solare equivalente	[-]
Gr	Numero di Grashof	[-]
h	Coefficiente di scambio termico liminare	[W/m ² K]
H	Altezza del sistema	[m]
h_e	Coefficiente di scambio termico liminare esterno	[W/m ² K]
h_i	Coefficiente di scambio termico liminare interno	[W/m ² K]
h_c	Coefficiente di scambio termico convettivo	[W/m ² K]
h_r	Coefficiente di scambio termico radiativo	[W/m ² K]
I_{clo}	Indice vestiario	[clo]
I_{in}	Radiazione solare trasmessa	[W/m ²]
I_{out}	Radiazione solare incidente sul piano verticale	[W/m ²]
I_h	Radiazione solare incidente sul piano orizzontale	[W/m ²]
\dot{m}	Portata d'aria	[kg/s]
L	Larghezza del sistema	[m]
L_i	Quota di radiazione solare sul nodo dal lato interno	[W/m ²]
L_{med}	Valore di luminanza medi	[cd/m ²]
L_e	Quota di radiazione solare sul nodo dal lato esterno	[W/m ²]
M	Tasso metabolico	[met]
Nu	Numero di Nusselt	[-]
Pr	Numero di Prandtl	[-]
\dot{q}	Flusso termico superficiale	[W/m ²]
$\dot{q}_i(n)$	Flusso termico assorbito dal nodo n	[W/m ²]
\dot{q}_s	Flusso termico solare	[W/m ²]
\dot{q}_r	Flusso termico radiativo	[W/m ²]

\dot{q}_{tot}	Flusso termico totale	$[W/m^2]$
\dot{q}_{sky}	Flusso termico verso la volta celeste	$[W/m^2]$
R	Resistenza termica	$[(m^2K)/W]$
R'	Potere fonoisolante apparente	[dB]
R_{si}	Resistenza termica superficiale interna	$[(m^2K)/W]$
R_{se}	Resistenza termica superficiale esterna	$[(m^2K)/W]$
T	Tempo di riverberazione	[s]
t_{cav}	Temperatura dell'aria in intercapedine	$[^{\circ}C]$
t_{inlet}	Temperatura dell'aria di immissione in intercapedine	$[^{\circ}C]$
t_n	Temperatura del nodo n	$[^{\circ}C]$
t_{in}	Temperatura dell'aria interna	$[^{\circ}C]$
t_{out}	Temperatura dell'aria esterna	$[^{\circ}C]$
U	Trasmittanza termica	$[W/m^2K]$
U^*	Trasmittanza termica equivalente	$[W/m^2K]$
U.R.	Umidità Relativa	[%]
U_g	Trasmittanza termica del vetro	$[W/m^2K]$
U_w	Trasmittanza termica della finestra	$[W/m^2K]$
V	Volume	$[m^3]$
v_{air}	Velocità dell'aria	$[m/s]$
Y_{ie}	Trasmittanza termica periodica	$[W/m^2K]$
λ	Conducibilità o conduttività termica	$[W/(mK)]$
α	Coefficiente di assorbimento solare	[-]
ε	Efficienza di isolamento dinamico	[-]
ε_i	Emissività faccia interna	[-]
ε_e	Emissività faccia esterna	[-]
η	Efficienza di pre-riscaldamento	[-]
θ	Angolo di incidenza della radiazione solare	$[^{\circ}]$
R^2	Il quadrato del coefficiente di correlazione	[-]
ρ_s	Coefficiente di riflessione solare	[-]
$\rho_{s,\theta\theta}=\rho_{\theta\theta}$	Coefficiente di riflessione solare per radiazione diretta	[-]
$\rho_{s,d}=\rho_d$	Coefficiente di riflessione solare per radiazione diffusa	[-]
$\rho_{s,\theta h}=\rho_{\theta h}$	Coefficiente di riflessione solare per radiazione emisferica	[-]
$\tau_l = \tau_v$	Coefficiente di trasmissione luminosa	[-]
τ_s	Coefficiente di trasmissione solare	[-]
$\tau_{s,\theta\theta} = \tau_{\theta\theta}$	Coefficiente di trasmissione solare per radiazione diretta	[-]
$\tau_{s,d} = \tau_d$	Coefficiente di trasmissione solare per radiazione diffusa	[-]
$\tau_{s,\theta h} = \tau_{\theta h}$	Coefficiente di trasmissione solare per radiazione emisferica	[-]
φ	Sfasamento	[h]
Δt	Differenza di temperatura	$[^{\circ}C]$
Δm	Differenza assoluta media	$[^{\circ}C]$ o $[W/m^2]$
Λ	Conduttanza termica	$[W/m^2K]$
Λ^*	Conduttanza termica equivalente	$[W/m^2K]$

Extended abstract

Con l'entrata in vigore della Direttiva europea 2009/91/CE (EPBD) e s.m.i. si pone l'attenzione verso la promozione di interventi volti alla costruzione di nuovi edifici ad energia quasi zero Nearly Zero Energy Building (NZEB), ovvero edifici ad altissima prestazione energetica.

Per il raggiungimento degli obiettivi imposti a livello europeo è necessaria una trasformazione del concetto di involucro edilizio: da semplice elemento di chiusura dal contesto climatico esterno, definito involucro passivo, a pelle, elemento regolatore attivo in grado di modulare l'interazione tra ambiente interno e ambiente esterno, creando un involucro "dinamico". Questo nuovo approccio ha portato allo sviluppo di tecnologie che promuovono l'adozione di componenti dinamici adattativi/responsivi nell'involucro edilizio e negli elementi costruttivi (Annex 44), fortemente integrati con gli impianti meccanici e con sistemi atti allo sfruttamento dell'energia solare. In questo contesto il lavoro si è concentrato sull'involucro trasparente, dato l'interesse nel panorama architettonico contemporaneo verso la trasparenza architettonica per i nuovi edifici ad uso terziario. La ricerca parte dall'analisi dello stato dell'arte, dove sono emersi due principali limiti tecnici all'adozione e allo sviluppo di tecnologie di involucro responsivo;

- la carenza di indicatori sintetici normati e in grado di rappresentare il comportamento dinamico dei sistemi di involucro edilizio
- la mancanza di strumenti semplificati per la simulazione energetica in una fase di progetto preliminare

Questi due elementi costituiscono gli obiettivi principali del lavoro di tesi, e sono stati perseguiti grazie alla partecipazione a quattro progetti di ricerca aventi come tema la valutazione prestazionale di componenti e sistemi di facciata trasparente a carattere innovativo.

Il lavoro di ricerca sull'involucro edilizio trasparente è stato affrontato a due scale; quella del componente dinamico e quella del sistema attivo di facciata. L'attività sperimentale è stata condotta per 4 casi studio e ha portato alla definizione di:

- una metodologia per l'acquisizione dei dati sperimentali di tecnologie trasparenti testate tramite *test cell*,
- una metodologia per l'elaborazione dei dati sperimentali, con il fine di caratterizzare il comportamento della tecnologia investigata dal punto di vista termico, luminoso e acustico.

Per l'elaborazione dei dati sperimentali l'attenzione è stata focalizzata su due aspetti:

- la definizione di una metodologia per identificare giornate tipiche da utilizzare nel confronto dei diversi casi studio (CS),
- la definizione di una metodologia per il calcolo di parametri prestazionali sintetici e l'individuazione di nuovi indicatori prestazionali.

Il primo punto è stato sviluppato proponendo di selezionare tra i dati raccolti giornate con condizioni al contorno vicine a quelle indicate dalla norma UNI 10349. I risultati di queste elaborazioni diventano quindi rappresentative del comportamento effettivo della tecnologia in analisi, nel periodo di interesse, durante una giornata con condizioni medie.

Nel secondo punto è stato sviluppato il calcolo dei parametri prestazionali standard (U-value, g-value) a partire dall'elaborazione dei dati sperimentali; i risultati ottenuti per i componenti e i sistemi attivi, hanno evidenziato una difficoltà dei parametri nel descrivere il comportamento delle tecnologie. Dall'elaborazione di una parte dei dati sperimentali si sono definiti i parametri sperimentali sintetici di trasmittanza termica (U) e fattore solare (g) tramite il metodo delle regressioni lineari e multiple, implementati attraverso diversi modelli di equazioni di bilancio. I parametri calcolati sono stati validati su un altro set di dati sperimentali. La validazione ha mostrato che l'utilizzo di parametri sintetici per caratterizzare il comportamento di sistemi di facciata attiva porta ad un errore di circa il 25%. Dai risultati si sono proposti nuovi parametri prestazionali.

Parallelamente si è sviluppato un modello di calcolo semplificato orario, per valutare la prestazione energetica di sistemi di facciata attivi. Il modello *MATS* Modelling Active Transparent Systems, ha una struttura a parametri concentrati che permette di analizzare in condizioni stazionarie sistemi di facciata trasparente attiva (FTA) con ventilazione meccanica, inserendo come dati di input, valori comunemente reperibili nelle schede tecniche. Lo strumento di calcolo è stato pensato per le fasi preliminari della progettazione. Il modello è stato validato con i dati sperimentali di due casi studio.

La metodologia di analisi dei dati sperimentali è stata applicata su alcuni casi studio, oggetto di progetti di ricerca sperimentali condotti nel triennio di dottorato. In particolare sono stati testati:

- 2 componenti di involucro dinamici Caso Studio 1 e 2,
- 2 sistemi di involucro attivi, facciate climatiche, Caso Studio b e c,

A livello di componente dopo un'analisi critica dello stato dell'arte sulle tecnologie di involucro trasparente dinamico, si è partecipato alla progettazione di nuovi elementi trasparenti dinamici. Si sono realizzati due prototipi dei progetti più promettenti:

- un componente con vetrocamera con integrazione di materiale a cambiamento di fase granulare Caso Studio 1 (CS1),
- un componente con triplo vetrocamera e integrazione di materiale a cambiamento e di un layer termotropico Caso Studio 2 (CS2),

Il prototipo CS1, non ha mostrato risultati particolarmente interessanti dal monitoraggio in campo, mentre risultati più promettenti sono stati rilevati dal prototipo CS2. La sperimentazione del CS2 è stata condotta al fine di testare due diverse configurazioni del componente in funzione della posizione del PCM. La prestazione del componente è stata descritta dal punto di vista termico e luminoso e confrontata con due componenti di riferimento. Particolare attenzione è stata data all'analisi del comportamento del layer termotropico, che integrato nella vetrata tripla porta ad una riduzione della dinamicità dei parametri ottico e solari. I risultati dell'elaborazione dei dati sperimentali hanno mostrato un buon comportamento della tecnologia innovativa, in particolare nel periodo estivo, quando il CS2 è in grado di ridurre di un terzo il flusso termico superficiale rispetto a una tecnologia di riferimento.

A livello di sistema di involucro attivo trasparente si sono seguite due campagne sperimentali relative a due facciate trasparenti climatiche Somec e Coopsette (CSb e CSc).

La facciata climatica Somec (CSb) è stata caratterizzata dal punto di vista termico, luminoso e del comfort termico. I risultati del caso studio CSb sono stati confrontati con quelli di una facciata di riferimento e si è misurato che il risparmio energetico per unità di superficie di facciata è di circa il 40 % nel periodo invernale e del 48% nel periodo estivo, rispetto alla tecnologia di riferimento. Il caso studio della facciata Coopsette (CSc), presenta due diverse tecnologie di facciata attiva a confronto che sono state caratterizzate tramite l'analisi dei dati sperimentali dal punto di vista termico e del comfort termico, luminoso e acustico.

Il modello di calcolo MATS è stato validato con i dati sperimentali dei casi studio delle facciate climatiche. I risultati della validazione mostrano che il modello è in grado di simulare il comportamento delle facciate in modo corretto durante la notte e in assenza di radiazione solare, mentre in presenza di elevato irraggiamento i valori di temperatura e flussi termici modellati sono maggiori rispetto a quelli misurati.

Dall'analisi dei risultati derivanti della validazione sui due casi studio, è possibile affermare che il modello fornisce un'indicazione corretta del comportamento della facciata attiva testata, per una fase della progettazione preliminare.

In ultima analisi i risultati del modello MATS per un caso studio sono stati confrontati con quelli simulati con un modello di calcolo avanzato sviluppato nel gruppo di ricerca da F. Zanghirella. Le temperature calcolate dal modello avanzato mostrano dei risultati migliori rispetto a quelli di MATS, mentre i flussi termici modellati da MATS hanno dei valori più vicini a quelli misurati del modello avanzato.

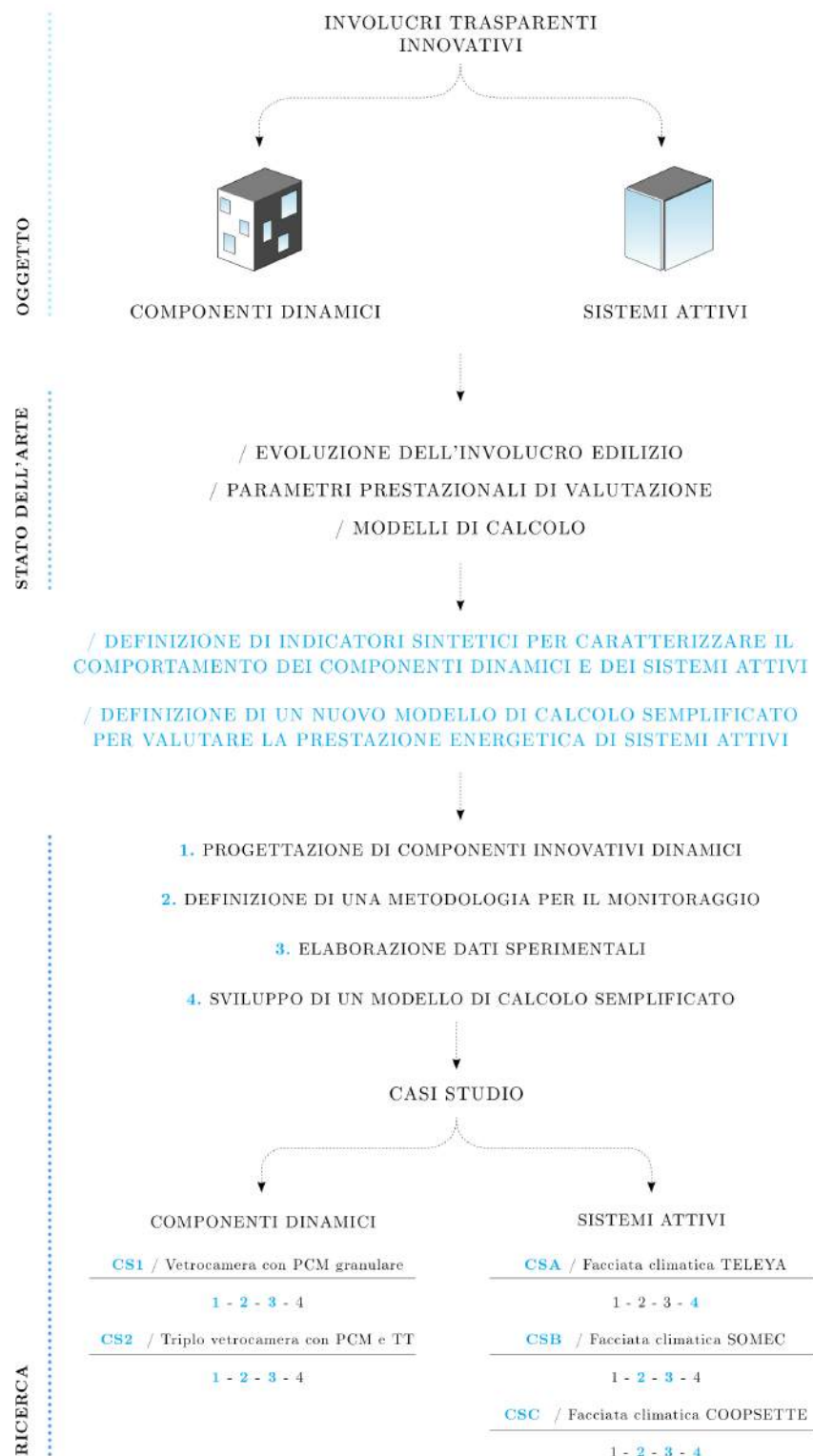


Figura 1: Schema sinottico del lavoro di tesi.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Obiettivi e metodi della ricerca

La ricerca affronta il tema dell'involucro edilizio trasparente innovativo e parte dall'esperienza maturata dal gruppo di ricerca TEBE (unità di ricerca BET Building Envelope Technology) da circa dieci anni. La partecipazione a diversi progetti di ricerca sperimentali ha permesso di sviluppare il lavoro di tesi su diverse tipologie di sistemi e componenti di facciata trasparenti innovativi.

Il lavoro è partito dall'analisi dello stato dell'arte che si è articolato in tre parti:

- l'analisi dell'evoluzione dell'involucro edilizio,
- l'analisi degli indicatori prestazionali sintetici per valutare la prestazione energetica e il comfort indoor,
- gli strumenti attualmente presenti per la modellazione energetica.

In particolare dall'analisi dello stato dell'arte si è studiata l'evoluzione legislativa seguita da quella tecnologica dell'involucro edilizio, dove l'involucro si è trasformato da elemento passivo ad attivo. Queste nuove tecnologie di involucro innovativo con un comportamento dinamico o attivo, non sono facilmente caratterizzabili dal punto di vista fisico tecnico con parametri prestazionali sintetici. Infatti il comportamento della tecnologia non permette di essere descritto da indicatori sintetici normati. Anche per questi motivi l'applicazione di queste tecnologie è ancora limitata.

Da questa prima fase è stato possibile individuare gli obiettivi della ricerca:

- definire indicatori sintetici per caratterizzare il comportamento dei componenti dinamici e dei sistemi attivi,
- definire un nuovo strumento di calcolo semplificato per valutare la prestazione energetica di sistemi attivi per una fase preliminare di progetto.

Gli obiettivi della tesi sono stati perseguiti grazie alla collaborazione in diverse attività sperimentali di componenti e di sistemi di facciata, che hanno permesso di avere a disposizione una importante mole di dati sperimentali.

Dall'esperienza sull'attività sperimentale è stato possibile definire:

- una metodologia per il monitoraggio in campo di grandezze per la caratterizzazione energetica, luminosa, acustica,
- una metodologia per l'elaborazione dei dati sperimentali.

In particolare il secondo punto si è focalizzato sul:

- metodo per definire le giornate tipiche per analizzare i casi studio,
- tema dei parametri prestazionali sintetici.

Il lavoro di ricerca ha portato allo sviluppo di un modello semplificato per la valutazione energetica di sistemi di facciate attive MATS (Modelling Active Transparent Systems) 7. Il nuovo modello è stato validato con i dati sperimentali di due casi studio su sistemi di facciata.

Infine si è proposto un confronto tra i risultati ottenuti dal modello semplificato e quelli di un modello avanzato.

La trattazione del tema di ricerca si sviluppa in nove capitoli così articolati:

- I primi tre capitoli costituiscono lo stato dell'arte e affrontano tre diversi temi:
 - l'evoluzione legislativa e tecnologica dell'involucro edilizio capitolo 2,
 - i parametri prestazionali per la valutazione energetica e del comfort indoor capitolo 3,
 - modelli di calcolo per la valutazione della prestazione energetica di componenti e sistemi trasparenti capitolo 4.
- Viene definita la metodologia per:
 - l'acquisizione dei dati in campo nel capitolo 5,
 - l'elaborazione dei dati sperimentali nel capitolo 6.
- Nel capitolo 7 viene descritto e sono definite le equazioni del nuovo modello di calcolo semplificato MATS.
- Nel capitolo 8 sono presentati i casi studio utilizzati nel lavoro
- I risultati sono divisi in due capitoli:
 - nel capitolo 9 quelli relativi all'attività sperimentale,
 - nel capitolo 10 quelli relativi all'applicazione e validazione del nuovo modello di calcolo.

Capitolo 2

L'evoluzione legislativa e tecnologica dell'involucro edilizio

2.1 Il quadro normativo di riferimento

Con l'entrata in vigore della Direttiva europea 2009/91/CE (EPBD) e la successiva emanazione della Direttiva europea 2010/31/UE (EPBD recast) si pone l'attenzione verso la promozione di interventi volti alla costruzione di edifici ad energia quasi zero (NZEB Nearly Zero Energy Building), ovvero edifici ad altissima prestazione energetica. Nella Direttiva vengono definiti come edifici in cui *“il consumo totale annuale di energia primaria deve essere uguale o inferiore alla produzione energetica ottenuta in loco con le energie rinnovabili”*. Per il conseguimento degli obiettivi descritti dalla normativa europea viene richiesto al progettista di adottare soluzioni tecnologiche per la riduzione del fabbisogno energetico nel periodo invernale ed estivo.

Sia la legislazione nazionale (Dlgs 311/2005 e s.m.i.) che quella regionale (L.R. 28.05.2007 n. 13) pongono l'enfasi sulla corretta progettazione dell'involucro edilizio, fissando requisiti specifici di isolamento termico, inerzia termica e controllo della condensazione, per quel che riguarda l'involucro opaco, e requisiti di isolamento termico e controllo solare e luminoso per l'involucro trasparente. Inoltre, viene introdotto l'obbligo di produrre energia termica ed elettrica con fonti rinnovabili, e ciò indirizza verso l'introduzione di elementi d'involucro con funzione di captazione ed utilizzo dell'energia solare (componenti attivi). Il decreto legislativo n. 28 del 3 marzo 2011 sancisce l'obbligo di integrare nell'involucro edilizio tecnologie per la produzione di energia elettrica (allegato 3).

Inoltre diventa obbligatorio coprire una certa percentuale del fabbisogno dei consumi per acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento con impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Di pari passo con l'evoluzione legislativa, si riscontra l'emanazione di nuove norme tecniche a livello nazionale (UNI) e internazionale (EN e ISO), che cercano di costituire un quadro completo per la valutazione delle prestazioni energetiche dei componenti dell'involucro. A livello nazionale per la prestazione termica

dell'involucro edilizio è necessario verificare: i valori limite di trasmittanza termica per l'involucro opaco e trasparente, la massa frontale o la trasmittanza termica periodica (da verificarsi in alternativa alla massa frontale per determinati orientamenti). Secondo il Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009 n. 59, nel caso di utilizzo di tecnologie o materiali definiti innovativi come coperture a verde, la scelta deve essere corredata da adeguata documentazione e certificazione che specifichi l'equivalenza in termini di prestazione energetica rispetto ai limiti introdotti dal decreto.

2.2 L'involucro edilizio: da passivo ad attivo

L'involucro edilizio costituisce la separazione tra l'ambiente esterno e l'ambiente interno, ed ha la funzione di garantire un adeguato livello di comfort ed assicurare un ottimale livello di efficienza energetica. Le moderne facciate sono il risultato di un'evoluzione tecnologica che si è sviluppata lentamente nel corso dei millenni, ma che ha visto una brusca accelerazione nell'ultimo secolo. La funzione basilare tradizionalmente assegnata all'involucro edilizio, è stata quella di creare uno spazio confinato e proteggere l'ambiente interno – condizionato – dalle intemperie e dalle sollecitazioni di un ambiente esterno ostile. La necessità di realizzare uno scudo protettivo rappresenta un concetto antico quanto la specie umana. Prima dell'introduzione dei sistemi di climatizzazione la forma dell'edificio era determinata in base al clima in cui si trovava. Pertanto per millenni all'involucro edilizio ed ai suoi componenti (pareti, facciate, coperture, finestre, porte, ecc.) è stato assegnato il compito primario di creare un effetto “barriera”, “scudo” che permettesse di disaccoppiare quanto più possibile le condizioni climatiche esterne da quelle interne, esaltando la capacità di separazione e le proprietà di isolamento e “impermeabilizzazione” in senso lato dei componenti. Conseguentemente, nel corso della storia, l'involucro edilizio è stato prevalentemente realizzato mediante massicce pareti opache punteggiate da poche e piccole aperture per il passaggio della luce e il ricambio dell'aria. Spesso l'apertura era unica per ogni unità abitativa e svolgeva diversi ruoli; ingresso, ricambio d'aria e passaggio della luce. A partire dal I secolo d.C. il vetro inizia ad essere utilizzato anche nel campo dell'architettura e non più solo sotto forma di piccoli oggetti e utensili. Con lo sviluppo tecnologico e l'avvento del vetro si inizia ad applicare il vetro alle aperture per il raggiungimento di una migliore qualità dell'abitare. Le lastre di vetro da finestra, ottenute col metodo della colatura, venivano montate su telai di legno ed utilizzate negli edifici pubblici, principalmente nelle Terme e nelle ricche *domus* private. L'invenzione della soffiatura incrementò nel corso del I secolo l'uso del vetro piano a scopo funzionale e decorativo [2].

In tal modo, con un solo componente, era possibile fornire una sufficiente protezione termica e l'ingresso della luce in ambiente. La presenza di una struttura muraria ad elevata inerzia termica consentiva un efficace effetto di accumulo di calore e la resistenza termica, pur se non ottimale, era almeno adeguata alla qualità ambientale richiesta all'epoca. Nei secoli questa architettura tradizionale si è evoluta sia in termini di materiali che di tecniche costruttive, ma è rimasta fedele ai propri canoni progettuali senza presentare alcuna radicale innovazione sino alla soglia del XX secolo. Con le teorie del Modernismo si

afferma una corrente di pensiero architettonico che cambia profondamente sia l'atteggiamento verso la forma che la tecnologia dell'involucro edilizio. Grazie a questa innovazione culturale, ed al miglioramento e all'industrializzazione dei processi costruttivi, si sono iniziati ad utilizzare materiali diversi e più evoluti (acciaio, calcestruzzo, vetro, ecc.); ciò ha consentito di "smaterializzare" le superfici dell'involucro edilizio, separando le funzioni di resistenza meccanica dalle altre funzioni (termica, protettiva, ecc.). I sistemi di facciata trasparenti attivi vetrate vengono teorizzati per la prima volta da Jean-Baptiste Jobard, nel 1849 [81]. Nel 1914 P. Scheerbart nel suo trattato architettonico *"Architettura di vetro"* [83] riprende il concetto di edifici interamente trasparenti, come in un sogno, parla di un incontro tra la natura e la tecnica senza contemplare la funzionalità del vetro e cemento che invaderà il mondo. Dagli anni '20 le facciate tradizionali solide, compatte, massive – possono ora essere alleggerite con superfici "incorporee" e trasparenti, la cui estensione è via via aumentata sino a rimpiazzare quasi completamente, in certi casi, le superfici opache. Una nuova tecnologia per la produzione del vetro basata sull'invenzione di Fourcault (1904) e I. W. Colburn (1905) inizia ad essere adottata in questi anni facilitando molto la produzione di lastre vetrate.

La diffusione di facciate vetrate ha degli svantaggi: le elevate dispersioni termiche nel periodo invernali e gli elevati carichi solari nel periodo estivo. Probabilmente proprio in risposta alle criticità degli edifici vetrati intorno agli anni '30 Le Corbusier formula la sua idea di "mur neutralisant" e "la respiration exacte". Per la prima volta si formula la possibilità di associare tecniche passive e attive per il controllo dei flussi energetici in un edificio. Il concetto di "mur neutralisant" è di creare un sistema di involucro opaco o trasparente in grado di annullare il flusso di calore e di aria che lo attraversa, insomma una parete adiabatica. Mentre con il termine "la respiration exacte" Le Corbusier probabilmente si riferiva all'integrazione del sistema impiantistico e quindi all'analogia con il sistema respiratorio umano.

Nel 1969 R. Banham [22] critica gli edifici con elevati consumi energetici e la separazione tra architettura e clima locale. A partire dalla metà degli anni '70 anche a causa della crisi, iniziano ad applicarsi le prime disposizioni legislative in materia di contenimento dei consumi energetici e inizia a diffondersi l'applicazione dell'isolamento termico agli elementi di involucro disperdenti.

Dal punto di vista architettonico l'involucro edilizio è da sempre stato il primo ricettore dell'evoluzione di prassi costruttive. La realizzazione di forme complesse, superfici fluide che si allontanano dalle forme geometriche tradizionali nasce da tre elementi [69]: l'interazione tra i diversi operatori del processo, l'incremento di interoperabilità tra software di progettazione, lo sviluppo di un efficiente involucro edilizio. Dal punto di vista della prestazione energetica l'involucro edilizio di ultima generazione deve rispondere a normative energetiche che tendono verso limiti sempre più restrittivi per il raggiungimento degli obiettivi 20-20-20. Oltre a dovere garantire una buona performance energetica riassumibile come un elemento in grado di ridurre i carichi termici in inverno ed estate e garantire il comfort termico e luminoso deve produrre una quota di energia consumata dall'edificio. La ricerca sull'involucro edilizio ha operato su più linee di sviluppo: da un lato l'involucro ha assunto un ruolo nuovo, trasformandosi da semplice elemento di chiusura, di barriera protettiva al contesto climatico esterno (involucro definito "passivo") a pelle, cioè a membrana permeabile e selettiva, elemento regolatore attivo dell'interazione tra ambiente interno e ambiente esterno (invo-

lucro “dinamico”); dall’altro è passato da semplice componente di trasferimento dei flussi energetici in gioco a componente integrante sistemi per la produzione e la conversione di energia (involucro “attivo”) [25]. Nello schema della figura 2.1 viene rappresentato l’evoluzione dell’involucro edilizio. Da elemento di chiusura passivo che risponde alle normative in vigore passa a un livello tecnologico successivo diventando passivo avanzato. Rientrano in questa categoria le pareti verdi e i tetti verdi. Il salto tecnologico successivo è la caratteristica di dinamicità. I componenti di involucro con questa caratteristica mutano le loro proprietà in funzione delle condizioni al contorno. Attualmente la frontiera più avanzata è l’integrazione del componente di involucro con il sistema impiantistico. La dinamicità non è più solo a livello di componente ma di sistema involucro e impianto [84].

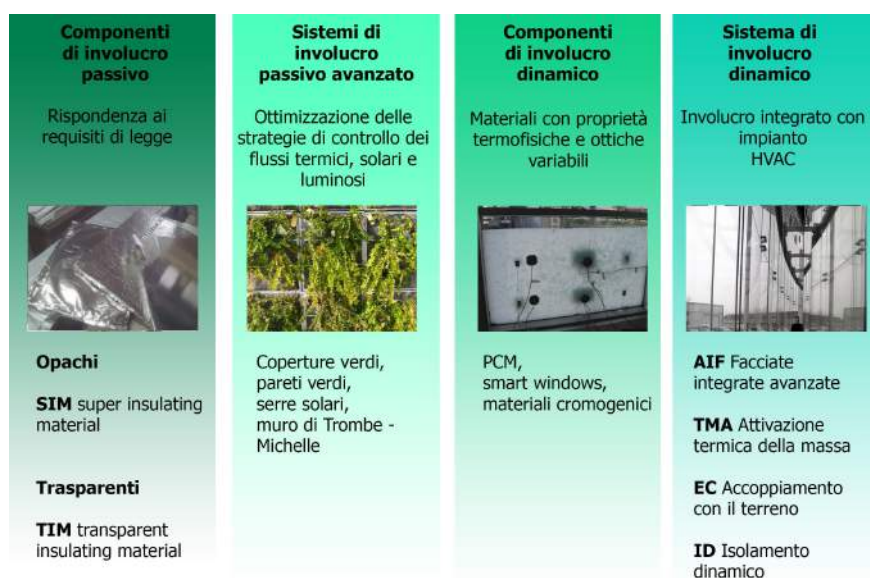


Figura 2.1: L’evoluzione dell’involucro edilizio da [84]

2.2.1 Componenti di involucro edilizio passivo opaco

Nella classificazione utilizzata nel lavoro di ricerca ci si riferisce ai componenti di involucro passivo come a quelle tecnologie per l’isolamento termico in grado di garantire il rispetto delle normative.

Negli ultimi anni l’innovazione tecnologica ha diffuso sul mercato dei materiali edilizi tecnologie provenienti dal settore aerospaziale. Il trasferimento tecnologico ha portato allo studio di tecnologie per implementare l’isolamento termico e aumentare l’inerzia termica dell’edificio. Per quel che riguarda l’isolamento termico si è sviluppato un nuovo tema di ricerca; i **SIM** Super Insulating Material, **materiali super isolanti**. Queste tecnologie per l’isolamento sfruttano principalmente tre strategie per ridurre lo scambio termico; il vuoto, la nano porosità, il riempimento dei pori con gas con una conducibilità termica più bassa di quella dell’aria. Tra questi materiali rientrano i materiali isolanti termo

riflettenti, i materiali derivanti dall'aerogel, i pannelli sottovuoto (VIP Vacuum Insulation Panels) e i GFP, Gas Filled Panel.

Gli isolanti termoriflettenti, su cui non è tuttavia ancora presente una specifica letteratura scientifica in materia, grazie all'interposizione di strati bassoemissivi e riflettenti presentano una valida prestazione termica grazie alla limitazione dello scambio termico radiativo. Alcuni studi stanno valutando le prestazioni termiche di questi materiali attraverso lo sviluppo e la validazione di modelli di calcolo con dati sperimentali [79]. I valori di resistenza termica di questi materiali si attestano tra circa 0,50 e 0,21 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$), per applicazioni del materiale termoriflettente in intercapedine verticale da 20 mm non ventilata, con valori di emissività termica tra 0,03 e 0,50 [-] [19].

Per quel che riguarda la tecnologia dell'aerogel le prime sperimentazioni risalgono al 1931, ma solo di recente si è iniziato a parlare di questo materiale in ambito edilizio. Le speciali proprietà isolanti dell'aerogel si devono alla sua particolare struttura fisica e chimica, risultato di un complicato processo di produzione. Il materiale presenta una matrice porosa con una scarsissima densità apparente: è composto per il 96 % da aria e per il 4 % da silice (massa volumica $135 \text{ kg}/\text{m}^3$). Il materiale si può presentare sotto forma granulare o monolitica. La conducibilità termica dei prodotti attualmente in commercio è intorno a $0,020 \text{ W}/(\text{mK})$ mentre per aerogel monolitici si scende a $0,016 \text{ W}/(\text{mK})$, valori molto bassi se paragonati a quelli dei tradizionali materiali isolanti.

Gli isolanti sotto vuoto sfruttano il principio per cui attraverso il vuoto non si hanno scambi convettivi e conduttivi. Questa tecnologia presenta valori di conducibilità termica (intorno a $0,004 \text{ W}/(\text{mK})$) anche dieci volte inferiori a quelle dei materiali standard. Questa caratteristica permette di ottenere valori di isolamento molto elevati anche con spessori ridotti, dato particolarmente interessante nelle riqualificazioni edilizie. Uno dei limiti principali è la necessità di essere maneggiati e applicati con estrema attenzione poiché un'accidentale scalfittura del rivestimento del pannello durante il trasporto, la fase di stoccaggio o la posa in opera può ridurre drasticamente le prestazioni termiche. Una possibile applicazione che limita questo rischio è l'utilizzo dei pannelli in strutture prefabbricate. Altro elemento di criticità è la correzione del ponte termico che si viene a creare tra pannelli accostati (le dimensioni del pannello sono limitate a circa 60 cm). La durabilità dei materiali superisolanti "*Long-Term Performance of Super-Insulation in Building Components and Systems*" è un tema attualmente oggetto di un'attività di ricerca internazionale (EBC, Annex 65, 2013-2017). Diverse ricerche scientifiche stanno valutando la convenienza economica di queste tecnologie ancora particolarmente costose.

Un altro tema molto attuale sono le superfici fredde (cool roofs). L'applicazione di coatings riflettenti nel NIR permette di limitare l'innalzamento della temperatura superficiale di strutture esposte alla radiazione solare. Questi materiali sono caratterizzati da un basso fattore di assorbimento solare e sono in grado di riflettere fino all'85 % della radiazione solare incidente. Il mantenimento della temperatura superficiale più bassa, permette di ridurre il flusso di calore che attraversa la struttura per conduzione, diminuendo quindi i fabbisogni di energia per il raffrescamento e migliorando le condizioni di comfort interno. L'applicazione più diffusa di questi materiali è sulle coperture. I limiti di questa tecnologia risiedono nelle problematiche tecniche di applicabilità ad edifici esistenti ed alla necessità di mantenere la superficie trattata pulita dal deposito di polveri e da elementi che ne possono ridurre la capacità di riflessione [38].

2.2.2 Componenti di involucro edilizio passivo trasparente

Come noto l'involucro trasparente ha minori capacità isolanti del sistema opaco e una bassissima inerzia termica: il suo impatto sulla prestazione energetica globale dell'edificio risulta quindi molto elevato. Secondo alcuni studi l'involucro trasparente è responsabile del 60 % delle dispersioni totali di un edificio [56]. Proprio a causa dei suoi limiti numerose sono state le ricerche sui materiali trasparenti per l'edilizia, su componenti vetrati, soprattutto nella direzione di migliorarne gli aspetti di isolamento termico e di controllo solare, senza penalizzarne la prestazione in termini di trasmissione della luce naturale. Inoltre, è cresciuta notevolmente l'attenzione agli aspetti di comfort correlata alla presenza di superfici trasparenti, quali in particolare il discomfort termico locale per asimmetria radiante (disagio dovuto alla differenza di temperatura radiante a cui è esposto un soggetto e causata dalla mancanza di uniformità di temperatura superficiale tra le superfici che delimitano l'ambiente). In relazione agli aspetti di controllo termico sul mercato si sono affacciati componenti vetrati con coating magnetronici basso emissivi e con intercapedine riempita di gas nobili (argon e kripton), soluzioni che hanno permesso di ridurre la trasmittanza termica da $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (vetrocamera standard con aria secca) a valori di $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Tra le tecnologie di isolamento trasparente rientrano le **finestre evacuate** (vacuum glazing). Questa tipologia di componenti trasparenti era stata concepita per la prima volta nel 1931, ma solo nel 1989 viene realizzata. Nelle finestre evacuate viene creato il vuoto nell'intercapedine tra le due lastre di un vetrocamera o di un triplo vetro. In questo modo mancando un mezzo, gli scambi termici convettivi nell'intercapedine sono annullati. La tecnologia al momento con le migliori prestazioni presenta valori di trasmittanza termica del vetro di $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ed è composta da un triplo vetro con una camera evacuata al 90% una camera con argon e rivestimento low-e. Questa tecnologia presenta uno spessore di soli 21 mm (NSG-SPACIA 21). Per raggiungere gli stessi valori di trasmittanza termica senza utilizzare la tecnologia della finestra evacuata gli spessori sarebbero stati il doppio [56]. Questa tecnologia risulta dunque particolarmente adatta per gli interventi di riqualificazione energetica.



Figura 2.2: Posizionamento di areogel granulare nell'intercapedine di un vetrocamera.

Ai fini del controllo solare sono stati, invece, sviluppati coating magnetronici selettivi in grado di agire in modo selettivo sulle diverse lunghezze d'onda della radiazione solare incidente, riducendo la trasmissione solare e mantenendo al contempo elevata la trasmissione luminosa. Ulteriori innovazioni hanno

riguardato il campo dei materiali polimerici, con l'introduzione sul mercato di soluzioni quali gli **isolanti trasparenti TIM**, transparent Insulating Materials, che hanno lo scopo di ottimizzare due proprietà solitamente opposte; la trasparenza e l'isolamento. Queste tecnologie sono in grado di mantenere elevati coefficienti di trasmissione luminosa e allo stesso tempo limitano le trasmissioni termiche per convezione ed irraggiamento. Fanno parte dei TIM l'areogel, il polimetilmetacrilato (PMMA) a struttura capillare o a nido d'ape o l'etilene tetrafluoroetilene (ETFE). Il PMMA a struttura capillare e a nido d'ape, collocato nell'intercapedine del vetrocamera, è in grado di ridurre gli scambi convettivi e permette di raggiungere valori di trasmittanza termica pari a $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. L'utilizzo di questo materiale richiede però spessori piuttosto elevati (tra i 50 e i 100 mm). Con fogli di ETFE estruso possono essere realizzati dei cuscini pneumatici con elevate proprietà termiche ed estrema leggerezza. Una membrana realizzata in ETFE può presentare, per uno spessore di 200 μm e peso di 700 g/mm², un valore di trasmittanza termica di $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Un notevole incremento di prestazione per le diverse soluzioni può essere ottenuto grazie al riempimento delle intercapedini con il già citato aerogel monolitico o granulare. Si sono raggiunti valori di trasmittanza termica del pacchetto vetrato inferiori a $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Oltre alle prestazioni termiche l'inserimento di questo materiale nell'intercapedine di elementi vetrati migliora l'isolamento acustico del componente. Dal punto di vista luminoso l'inserimento di aerogel nell'intercapedine di un componente vetrato porta ad una riduzione del coefficiente di trasmissione luminosa (τ_l) intorno al 25% per aerogel monolitico e al 66% per aerogel granulare rispetto ad un vetrocamera con rivestimento basso emissivo [28]. A titolo indicativo se un cuscino di ETFE o un vetrocamera vengono riempiti di aerogel il valore di trasmittanza può scendere a valori di $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Al miglioramento della prestazione del componente trasparente si è associato il miglioramento anche della prestazione termica di profili e distanziali, arrivando a ridurre la trasmittanza termica del sistema vetrato (nel suo insieme vetro, profilo e distanziali) a valori pari a $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ per telai metallici e a valori pari a $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ per telai in legno. Sul tema del controllo solare numerose soluzioni relative sia al componente vetrato sia ai sistemi di schermatura solare sono oggi presenti sul mercato. Per quel che riguarda il componente vetrato, ai convenzionali vetri colorati in pasta, assorbenti, e ai vetri riflettenti, a riflessione incrementata tramite deposizione di *coating* sul substrato, si sono aggiunti i vetri con microstrutture che rifrangono la radiazione secondo angoli predefiniti, quali ad esempio i vetri prismatici e i vetri selettivi. Questi ultimi sono caratterizzati da una trasmissione selettiva, in funzione della lunghezza d'onda, elevata nel campo del visibile e ridotta nel campo del solare. Nei progetti di riqualificazione l'applicazione di pellicole per il controllo solare sul componente vetrato esistente permette di modificare le caratteristiche ottiche dei vetri senza sostituire l'infisso, con costi dell'intervento molto contenuti. Nel campo della schermatura solare i progressi più significativi hanno riguardato i tessuti che costituiscono le tende tecniche, in termini di trama e materiali e le veneziane, in particolare relativamente a forme, colori e dimensioni delle lamelle. Inoltre si sono diversificati molto i meccanismi e le modalità di movimentazione dei sistemi frangisole, incrementandone la dinamicità della prestazione.



Figura 2.3: Cella di prova GReens Environment park.

2.2.3 Sistemi di involucro edilizio passivi avanzati

Con il termine involucro passivo avanzato si intendono quelle tecnologie con una certa dinamicità, ma con un comportamento non ancora definibile responsivo. Rispetto ai componenti di involucro passivo si passa dalla scala di elemento di involucro a quella di sistema di involucro.

Il progetto di sistemi passivi per il risparmio energetico deve essere strettamente legato alla località dell'edificio infatti il funzionamento della tecnologia è strettamente legata alle condizioni al contorno [80]. Tra questi rientrano soluzioni massive come le coperture verdi (soprattutto quelle a carattere estensivo), soluzioni più leggere come le pareti verdi, i sistemi solari passivi e le serre solari. Alcuni fanno rientrare in questa categoria anche le facciate a doppia pelle con ventilazione naturale (DSF, Double Skin Façade).

Questi sistemi di involucro sono in grado di agire sull'inerzia termica dell'edificio e di diminuire le temperature superficiali delle strutture cui sono applicate grazie alla presenza della terra e all'effetto evapo-traspirativo e di ombreggiamento della vegetazione. Il manto vegetale grazie al processo evapotraspirativo è in grado di mantenere la temperatura superficiale della parete o del tetto dove applicato, vicino a quella dell'aria esterna. Grazie a questa caratteristica la tecnologia verde è dinamica e passiva allo stesso tempo. Dal punto di vista della prestazione energetica il flusso termico superficiale nel periodo estivo è ridotto e la dinamica di surriscaldamento dell'ambiente è controllata. Diverse pubblicazioni scientifiche hanno dimostrato che l'applicazione di questa tecnologia è in grado di garantire vantaggi in termini di prestazione energetica anche nel periodo invernale [26]. In particolare le pareti prefabbricate modulari verdi creano uno strato d'aria tra la parete opaca a cui sono applicate e il modulo verde ad una temperatura superiore dell'aria esterna. La ricerca sta valutando l'effetto di queste tecnologie sull'ambiente acustico. L'applicazione di un elemento verde garantisce un miglior potere fonoisolante della tecnologia perchè aumenta la massa del componente. Alcuni risultati sembrano suggerire un effetto benefico sul clima acustico esterno, una riduzione dell'inquinamento acustico grazie all'elevato potere fonoassorbente di alcune specie vegetali [29]. Su una scala più ampia l'applicazione di tecnologie verdi è vantaggiosa per la riduzione dell'isola di calore, la riduzione degli inquinanti in aria grazie all'effetto filtrante delle piante.

2.2.4 Componenti di involucro edilizio dinamici

La caratteristica di dinamicità può essere associata ad un solo componente dell'involucro edilizio. Per quel che riguarda l'involucro trasparente da alcuni decenni la ricerca si sta occupando delle *smart windows* finestre intelligenti. Queste tecnologie sono caratterizzate da un comportamento dinamico. Le proprietà ottico-solari (coefficiente di trasmissione solare e luminoso) della tecnologia cambiano in funzione delle condizioni al contorno garantendo riduzione dei consumi energetici e comfort termico e visivo. Principalmente sono costituiti da materiali cromogenici in grado di modificare le loro proprietà ottiche in funzione di uno stimolo esterno. Tra questi esistono vetri adattativi alle condizioni al contorno fotocromici, termotropici e termocromici e vetri attivabili elettrocromici, gas cromici a cristalli liquidi.

I **vetri fotocromici** cambiano le loro proprietà in funzione della quantità di raggi ultravioletti che ricevono sulla loro superficie. Il cambiamento è reversibile al termine dell'esposizione il vetro torna ad essere trasparente. Dal punto di vista edilizio esistono diverse limitazioni alla diffusione di questa tecnologia. Alle variazioni delle condizioni al contorno la tecnologia risponde modificando le proprie proprietà con un tempo di circa 5 minuti. Nel caso di variazioni repentine del quantitativo di radiazione solare (cielo con nubi sparse) la tecnologia non è in grado di rispondere rapidamente alle variazioni. Inoltre i costi di realizzazione di ampie superfici con questa tecnologia sono alti [16].

I **vetri termotropici e termocromici** sono materiali trasparenti caratterizzati dalla capacità di modificare le loro proprietà ottiche in funzione di una variazione di temperatura che avviene sulla loro superficie grazie alle caratteristiche del polimero che li compone. Tale fenomeno è determinato da una reazione chimica reversibile che avviene nel polimero. Quando le condizioni termiche tornano ad essere statiche il film torna ad essere trasparente.

Il processo si innesca nei *vetri termocromici* quando si raggiunge una determinata temperatura della superficie detta temperatura della soluzione critica. Dopo il raggiungimento della temperatura critica i vetri termocromici cambiano le loro proprietà di trasmissione in particolare nel range dell'infrarosso. I *vetri termotropici* al raggiungimento di una determinata temperatura sono caratterizzati da un cambiamento delle proprietà di trasmissione sull'intero range dello spettro solare. La specchiatura termotropica al raggiungimento della temperatura critica assume una colorazione bianca lattea causata dai fenomeni di assorbimento energetico e di scattering luminoso. Questi materiali sono costituiti da due componenti con differenti indici di rifrazione, omogeneamente miscelati tra di loro alle basse temperature: ad esempio acqua ed un polimero (hydrogel) o due differenti polimeri (polymer blend). Alle basse temperature il polimero permette la trasmissione della luce naturale per la sua composizione chimica. Quando la temperatura sale fino alla LCST (Lower Critical Solution Temperature) le catene polimeriche si separano, in domini discreti delle dimensioni della lunghezza d'onda determinando lo scattering e la riflessione della radiazione incidente. Le proprietà ottiche del componente ne garantiscono un comportamento dinamico in grado di ridurre i carichi solari e quindi il fabbisogno di raffrescamento estivo. Alcuni studi stanno valutando la possibilità di applicare questi materiali su collettori solari per la produzione di energia da fonti rinnovabili [90].

Tra i componenti **trasparenti attivabili** (*tecnologie switchable*) rientrano i

vetri elettrocromici, gascromici, a cristalli liquidi. Tra questi quelli di maggiore interesse per scopi architettonici sono gli elettrocromici. Questi ultimi sfruttano il principio dell'elettrocromatismo, fenomeno per cui il passaggio della corrente elettrica in un materiale porta ad un cambiamento reversibile nella sua struttura chimica. A differenza dei materiali termotropici, termocromici e fotocromici che presentano un comportamento passivo i vetri elettrocromici reagiscono ad uno stimolo elettrico.

I vetri gasocromici sono in grado di modulare la propria trasparenza. In questa tecnologia viene integrato un strato metallico attivabile tramite un catalizzatore sulla faccia verso intercapedine di una lastra esterna di un vetrocamera o di un triplovetro. La principale criticità di questa tecnologia è che un ciclo di transizione completa richiede tra i 2 e i 20 minuti.

Le tecnologie a cristalli liquidi presentano alcune limitazioni nelle applicazioni edilizie su involucro esterno; sensibilità alla radiazione ultravioletta e surriscaldamento del sistema con conseguente malfunzionamento della tecnologia per ampie applicazioni.

Diverse sperimentazioni sono state condotte per integrare i **materiali a cambiamento di fase (PCM Phase Change Material)** a livello edilizio. L'integrazione di questi materiali è particolarmente interessante perché garantiscono un notevole aumento dell'inerzia termica della struttura e quindi la possibilità di smorzare i picchi di carico termico. Questi materiali sono in grado di accumulare calore sotto forma di calore latente per cambiare la propria fase da solida a liquida. Il calore viene rilasciato quando la temperatura si abbassa e la fase torna ad essere solida. Durante il processo di cambiamento di fase il calore viene accumulato e rilasciato senza significative variazioni di temperatura. Allo stato solido i materiali a cambiamento di fase si comportano come materiali da costruzione standard. Le caratteristiche di questo materiale possono essere utilizzate per aumentare l'inerzia termica del componente con piccoli spessori e per implementare le capacità di accumulo termico. Se il materiale viene utilizzato per migliorare l'inerzia termica può essere integrato nelle strutture murarie esterne, nell'intonaco o in partizioni interne. L'integrazione è particolarmente interessante per i componenti di involucro trasparente. Infatti alcuni di questi materiali, come ad esempio i paraffinici, nella fase liquida diventano trasparenti. Risultano ancora limitati i prodotti in commercio per l'edilizia e complicata la loro integrazione nell'involucro. [20]

2.2.5 Sistemi di involucro edilizio dinamici integrati

Nel primo paragrafo sono presentati le facciate intelligenti, multimediali, bio-attive e responsive, nel secondo uno dei soggetti del lavoro di tesi, le facciate attive trasparenti.

2.2.6 Le facciate intelligenti, multimediali, bio-attive e responsive

Quando si parla di involucro avanzato dal punto di vista tecnologico spesso si parla di involucri innovativi, intelligenti, multimediali, e responsivi.

Il termine **intelligente** è stato utilizzato in relazione agli edifici per la prima volta intorno agli anni '80. Il primo edificio definito intelligente è il Skidmore Owings and Merrill realizzato nel 1984 ad Hartford, Connecticut. L'edificio è

caratterizzato da un sistema integrato a fibra ottica che crea una rete di connessione tra i sistemi impiantistici dell'edificio, di circolazione (ascensori) e di sicurezza. Ad una più attenta analisi l'edificio può considerarsi intelligente per la sua interconnessione e integrazione impiantistica [71]. Dal punto di vista dell'involucro edilizio il termine intelligente è spesso associato a quello di pelle *“pelle intelligente”*. L'involucro edilizio viene definito come pelle dell'edificio per l'analogia con la pelle umana. L'involucro diventa la terza pelle dell'utente (dopo la pelle e i vestiti). La definizione di pelle intelligente fornita da Wigginton e Harris [93] è: *“a composition of construction elements confined to the outer, weather-protecting zone of a building, which perform functions that can be individually or cumulatively adjusted to respond predictably to environmental variations, to maintain comfort with the least use of energy”*.

Le **facciate multimediali** (*media façade*) sono definite come gli involucri edilizi con integrazione di display [53]. L'integrazione di tecnologie multimediali in facciata ha portato allo sviluppo dell'architettura multimediale. Questa tipologia di involucro edilizio può essere applicata agli edifici con differenti scopi; ornamento, pubblicizzare dei prodotti, rappresentazioni artistiche. Insieme agli aspetti puramente architettonici l'utilizzo delle media façade può portare a notevoli vantaggi anche dal punto di vista energetico per la gestione e il controllo dei flussi termici e luminosi attraverso l'involucro. La trasparenza molto ricercata dagli architetti per le facciate dei nuovi edifici potrebbe non essere più reale, ma solo riprodotta attraverso le immagini proiettate dai display in facciata oppure attraverso l'applicazione di pellicole *one-way*. In questo modo si risolverebbero tutte le criticità energetiche e di comfort termico derivanti dall'involucro trasparente. Nell'edificio a Beijing di Simone Giostra and Partners Architects la Greenpix Zero Energy Media Wall integra un sistema fotovoltaico e di LED. Durante il giorno la facciata converte l'energia solare in elettricità che utilizza la notte per l'illuminazione della media façade.

Il primo edificio con una **facciata bio-attiva** è stato costruito ad Amburgo in Germania nel 2013, nel quadro dell'International Building Exhibition (IBA) su progetto di Splitterwerk Architects e ARUP, figura ???. La bibliografia su questo tema è molto scarsa. Il principio di funzionamento prevede l'integrazione a livello di facciata di sistemi in grado di coltivare alghe per la produzione di bio-massa e bio-combustibile. Inoltre le alghe sono in grado di creare sistemi di schermatura dinamica della facciata. Infatti la concentrazione delle alghe aumenta in modo proporzionale alla quantità di radiazione solare incidente sulla facciata. La facciata dell'edificio ad Amburgo è costituita da pannelli vetrati che presentano quattro lastre di vetro e tre intercapedini. Le due intercapedini verso l'esterno sono riempite di gas argon per ridurre lo scambio termico convettivo e quindi le dispersioni termiche. Nell'intercapedine centrale viene fatto circolare un fluido che contiene il nutrimento per gli organismi. L'energia di scarto prodotta dai processi bio-chimici delle alghe (fotosintesi) può essere utilizzata per i consumi energetici dell'edificio.

La definizione di **elementi responsivi** in architettura è riportata nei rapporti dell'annex 44 (Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings) promosso dall'International Energy Agency. *“Responsive Building Elements are defined as building construction elements which are actively used for transfer and storage of heat, light, water and air. This means that construction elements (like floors, walls, roofs, foundation etc.) are logically and rationally combined and integrated with building service functions such as heating, cooling,*

ventilation and lighting. The development, application and implementation of responsive building elements are considered to be a necessary step towards further energy efficiency improvements in the built environment” [71].

Gli elementi responsivi sono dunque caratterizzati da:

- un comportamento dinamico
- dalla capacità di adattarsi alle condizioni al contorno
- dalla capacità di svolgere funzioni differenti
- da un controllo gestionale intelligente

Le potenzialità degli elementi responsivi possono essere sfruttate solo sotto la supervisione di un controllo intelligente, con opportune strategie atte alla regolazione degli elementi responsivi.

Le principali azioni che gli elementi responsivi sono in grado di svolgere sono di:

- modificare la superficie esterna
- modificare la superficie interna
- modificare le caratteristiche fisiche dei materiali per cambiare la:
 - la conduttività termica
 - l'inerzia termica
 - la trasparenza
 - la permeabilità

A. Compagno [34], oltre ad affermare che le facciate intelligenti sono quelle con un comportamento adattivo e responsivo, afferma che l'intelligenza di una facciata non si misura tramite la quantità di tecnologia integrata, ma attraverso la capacità del sistema di facciata di sfruttare le risorse naturali come la radiazione solare, il suolo e l'aria che fluisce nell'intercapedine.

Tra le tecnologie che si prospettano più interessanti a livello di involucro edilizio vengono identificate nell'annex 44: **le facciate avanzate integrate (AIF)**, i sistemi ad attivazione di massa termica (TM), sistemi accoppiati al terreno (Earth Coupling), sistemi di isolamento dinamico (Dynamic Insulation Wall) e i materiali a cambiamento di fase. Risulta dunque un elemento comune tra le tecnologie elencate in questo paragrafo l'integrazione del sistema di involucro al sistema impiantistico. Nel report riassuntivo dell' IEA-ECBCS Annex 44 “Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings” vengono definite le motivazioni e i vantaggi per la progettazione integrata degli edifici utilizzando gli elementi responsivi. In particolare si evidenzia un sostanziale miglioramento nelle prestazioni ambientali, energetiche e nei costi.

Nel lavoro di ricerca si focalizza l'attenzione solo sull'involucro verticale trasparente.

Il tema è particolarmente dibattuto a livello scientifico come dimostrato dall'elevato numero di pubblicazioni riguardanti involucri edilizi trasparenti e traslucidi [74]. Questa tecnologia di facciata viene classificata nell'annex 44 nella

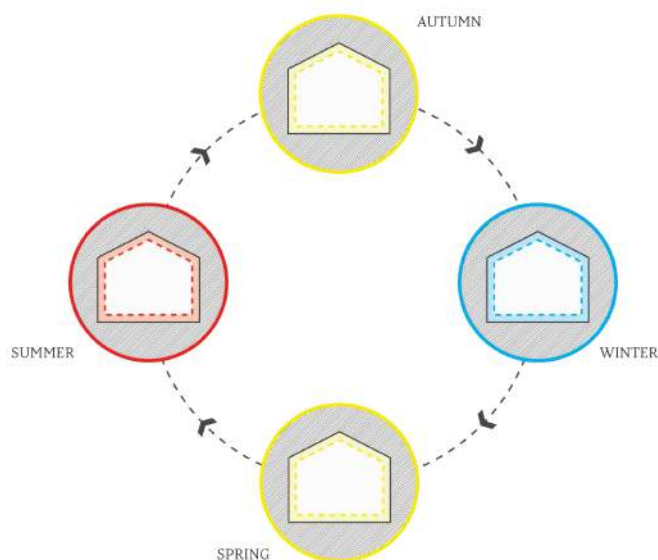


Figura 2.4: L'involucro edilizio responsivo

categoria Advanced Integrated Façade (AIF). *“AIF is a building envelope that exhibits adaptive characteristics that are in tune with both the physical/ climatic conditions of a particular location and the indoor environment requirements. An AIF provides the basic functions of shelter, security and privacy, while minimizing energy consumption. AIF are the actual development of what started with passive architecture principles and evolved, originally, into Double Skin Façades (DSF) and, recently, into the intelligent skins concepts. An intelligent skin may be defined as “a composition of construction elements confined to the outer, weather-protecting zone of a building, which performs functions that can be individually or cumulatively adjusted to respond predictably to environment variations, to maintain comfort with the least use of energy”. The concept of “intelligence” associated with DSF represents a change from a static envelope to one with a dynamic behaviour”.*

2.2.7 Le facciate attive trasparenti

Le Facciate Trasparenti Attive, FTA, (in inglese le ATF Active Transparent Façades) sono considerate un sottogruppo di un insieme di facciate vetrate più ampio: le facciate integrate avanzate (in inglese le AIF Active Integrated Façade). All'interno delle AIF oltre alle FTA rientrano i sistemi di finestra (SWindows).

Le FTA sono tecnologie di facciata trasparente accomunate dal fatto che presentano una doppia pelle vetrata divisa da un'intercapedine con dell'aria che fluisce e una schermatura. La seconda pelle esterna inizialmente nasce dalla necessità di proteggere la schermatura dagli agenti atmosferici e quindi di ridurre i costi di manutenzione e pulizia della facciata. In un secondo momento si notò

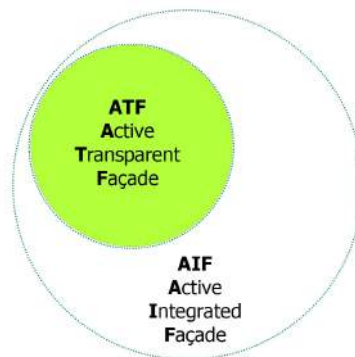


Figura 2.5: La classificazione delle facciate

che la pelle esterna vetrata, se opportunamente progettata, permetteva di ridurre i flussi termici sia nella stagione estiva che in quella invernale. Il principio di funzionamento di questi sistemi di facciata varia in base allo schema e alla tipologia di ventilazione. In generale è possibile schematizzare il funzionamento del sistema in base alla stagione. Nel periodo estivo i carichi solari entranti in intercapedine sono in parte rimossi dall'aria di ventilazione e in parte schermati dalla presenza della schermatura. Grazie alla presenza dell'intercapedine e dello schermo il flusso termico entrante in ambiente (comprensivo della quota a bassa e ad alta lunghezza d'onda) sarà quindi ridotto rispetto ad una tecnologia a pelle singola. Nel periodo invernale l'aria nell'intercapedine della facciata presenterà una temperatura maggiore di quella esterna e conseguentemente i flussi termici che attraverseranno il componente saranno ridotti. Infatti la pelle interna, che disperde calore verso l'esterno, non sarà a contatto diretto con l'aria esterna, ma sarà a contatto con l'aria in intercapedine che presenta una temperatura maggiore di quella esterna. Dall'analisi bibliografia emerge che seppure questa tecnologia di facciata sia conosciuta da tempo, le prime teorizzazioni sul suo funzionamento risalgono a metà dell'800 paragrafo 2.2, le ricerche scientifiche sull'effettivo comportamento della tecnologia partono dagli anni '90, ancora oggi sono relativamente pochi gli edifici costruiti con questo sistema [86], ma le pubblicazioni sul tema sono più di 1000. Da diversi studi emerge che i principali vantaggi derivanti da questa tecnologia sono un aumento delle condizioni di comfort luminoso, acustico e termico oltre ad una riduzione delle energie che attraversano l'involucro, una riduzione dei fabbisogni per la climatizzazione, il riscaldamento e l'illuminazione. Questi vantaggi vengono raggiunti solo se la tecnologia viene progettata in modo corretto per le condizioni climatiche del sito di progetto e viene pianificata l'integrazione del sistema impiantistico con l'involucro (ad esclusione delle facciate a doppia pelle con ventilazione naturale). I molti fattori che entrano in gioco nel funzionamento del sistema edificio/impianto devono essere accuratamente studiati e simulati per evitare scelte progettuali che portano verso risultati inattesi come dimostrato in diversi articoli [78].

Questo sistema tecnologico comporta un'extra costo di costruzione e di progettazione, sul mercato statunitense nel 2007 [78] è stato stimato che i costi di progettazione possono variare tra i 360 e i 500 \$ al metro quadro mentre la costruzione tra i 700 e 1800 \$ al metro quadro. Il report Best Façade del 2005 [87], riporta un costo totale per facciate climatizzata in Belgio di circa 500/700 euro al metro quadro. Nello stesso riferimento bibliografico [87] si riportano i prezzi totali di investimento dei sistemi Schüco a box per facciate a doppia pelle con intercapedine da 0,2 m, che variano tra i 560/610 euro al metro quadro in base alla scelta del sistema di schermatura mentre per le facciate a doppia pelle tra i 920 e i 1000 euro al metro quadro. Rispetto ad una facciata vetrata con schermatura esterna mobile il sistema di FTA comporta una spesa superiore di circa il 20 % [87]. Come riporta H.Poirazis (2004) [73] se si confrontano i costi di costruzione e progettazione di una facciata FTA con quelli di un sistema tecnologicamente equivalente come una facciata con vetri elettrocromici, termocromici o fotocromici, il sistema FTA risulta il più conveniente dal punto di vista economico.

Tra i principali svantaggi nell'applicazione di FTA in bibliografia si sono trovati:

- il costo di costruzione,
- la difficoltà nel controllo del fuoco e dei fumi nell'intercapedine del sistema nel caso di incendio,
- riduzione della superficie di pavimento calpestabile e quindi vendibile e affittabile a causa delle dimensioni dell'involucro trasparente,
- variabilità delle prestazioni (termiche, acustiche e luminose) del sistema in funzione delle scelte progettuali,
- dal punto di vista acustico questa tipologia di facciata può portare a delle limitazioni, in particolare per quel che riguarda la trasmissione del suono attraverso le facciate a canale, il rumore provocato dall'aria che fluisce in intercapedine o la trasmissione che avviene attraverso le bocchette per la ventilazione dell'intercapedine,
- dal punto di vista termico, rischio di fenomeni di surriscaldamento dell'aria in intercapedine nel periodo estivo.

Le FTA sono state classificate secondo diversi criteri e in letteratura non è presente una classificazione univoca e chiarezza nella terminologia da utilizzarsi. Sono presenti principalmente tre classificazioni secondo:

- il tipo di ventilazione dell'aria in intercapedine
- lo schema di ventilazione dell'aria in intercapedine
- la configurazione di funzionamento

La classificazione delle FTA secondo *la tipologia della ventilazione dell'aria* in intercapedine le divide in tre gruppi:

- ventilazione naturale
- ventilazione meccanica

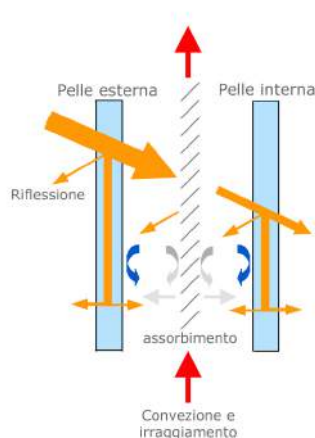


Figura 2.6: Principio di funzionamento delle FTA.

- ventilazione ibrida

La seconda classificazione divide le FTA in base allo *schema di ventilazione*. In particolare si potrà distinguere tra quattro tipologie in base alla provenienza dell'aria che fluisce nell'intercapedine secondo lo schema in figura ??:

- cortina d'aria interna (1,2)
- cortina d'aria esterna (3,4)
- immissione dell'aria in intercapedine dall'interno o dall'esterno (5,6)
- estrazione dell'aria dall'interno o dall'esterno (7,8)
- aperta o a buffer (9,10)

La terza classificazione divide le FTA in base alla *configurazione di funzionamento*. Si distingue tra due tipologie di facciate trasparenti attive:

- le facciate climatiche (CF climate façade)
- le facciate a doppia pelle (DSF double skin façade)

Nel lavoro di tesi si applica questa terminologia che è stata proposta nell'Annex 44 dell'IEA. Altri autori parlano di Multiple-skin façade (A. Compagno [34]) intendendo facciate costituite da due pelli in vetro con interposta una schermatura. All'interno di questa categoria rientrano le facciate ventilate meccanicamente, mentre le facciate a doppia pelle costituiscono un'altra categoria. Altri considerano le facciate a doppia pelle come sistemi a controllo ambientale passivo e quindi li classificano come sistemi di involucro edilizio passivo.

Le facciate climatiche In questa tipologia di facciate l'aria fluisce nell'intercapedine grazie ad un sistema di ventilazione meccanica. Solitamente la pelle esterna è costituita da un vetrocamera e la pelle interna da un vetro singolo. L'aria immessa dall'ambiente interno nell'intercapedine fluisce per differenza di pressione e grazie alla presenza di ventilatori. In presenza di radiazione solare l'aria si scalda e si crea un effetto camino che favorisce la ventilazione dell'intercapedine. L'estrazione dell'aria in intercapedine avviene per ogni piano dell'edificio. La schermatura nell'intercapedine è generalmente a rullo o veneziana e si può ispezionare e mantenere l'intercapedine attraverso l'apertura della pelle interna. Uno dei rischi principali di questa tecnologia è la creazione di fenomeni di condensa superficiale sul vetrocamera esterno lato verso intercapedine. L'integrazione impiantistica di questa tipologia di sistema di involucro edilizio permette di sfruttare l'aria in uscita dall'intercapedine. Infatti nel periodo invernale l'aria estratta dalla facciata presenta una temperatura maggiore dell'aria esterna e può quindi essere usata per preriscaldare l'aria di ventilazione dell'ambiente. Nel periodo estivo l'aria in estrazione dall'intercapedine ha una temperatura elevata perché ha contribuito alla rimozione dei carichi solari.

Le facciate a doppia pelle Questa tecnologia di facciata è composta da due pelli trasparenti, una interna ed una esterna, un' intercapedine ventilata naturalmente con uno schermo solare. Solitamente la pelle interna presenta un vetrocamera mentre quella esterna un vetro singolo. Esistono diverse classificazioni per queste tecnologie di facciate, in base allo schema di ventilazione che dovrebbe essere scelto in funzione della stagione [88]. Nel periodo invernale è preferibile utilizzare la facciata a doppia pelle come un doppio serramento, chiudendo le bocchette per la ventilazione dell'intercapedine ed evitando quindi il fluire dell'aria. In questa stagione infatti l'aria esterna si trova da una temperatura più bassa di quella interna. Nel periodo estivo invece si sfrutta la ventilazione naturale in intercapedine per rimuovere parte dei carichi solari. In questa configurazione è preferibile mantenere chiuse le aperture dell'ambiente verso l'intercapedine per evitare l'ingresso in ambiente di un flusso d'aria ad una temperatura maggiore di quella esterna. Durante la notte quando la temperatura dell'aria esterna è scesa è consigliabile attivare la ventilazione naturale.

Capitolo 3

I parametri prestazionali per la valutazione energetica e del comfort indoor

Lo scopo del capitolo è descrivere lo stato dell'arte sui parametri prestazionali per sistemi e componenti di involucro innovativi trasparenti. La caratteristica delle tecnologie analizzate nella ricerca è il comportamento dinamico, conseguentemente le proprietà termofisiche delle tecnologie in analisi variano durante il giorno e le stagioni. In questo paragrafo si analizzano i parametri prestazionali presenti a livello normativo per la caratterizzazione delle tecnologie dal punto di vista termico, acustico e luminoso. Al termine di ogni paragrafo a titolo esemplificativo e di analisi dello stato dell'arte sono riportati delle proposte di indici e di approcci di valutazione prestazionale per gli involucri trasparenti. La variabilità delle prestazioni termiche di queste tecnologie è il loro punto di forza, ma può essere un punto debole nel momento che a livello normativo mancano gli indicatori per valutare la prestazione di questi sistemi. Come rilevato nel report dell'ENEA del 2009, "Caratterizzazione e valutazione di materiali trasparenti innovativi e sistemi schermanti" allo sviluppo tecnologico descritto nel capitolo precedente segue un adeguamento piuttosto lento del parco normativo, attualmente non ancora in grado di far fronte alla necessità di definire metodi e procedure standardizzate per il calcolo e la misura di sistemi trasparenti [98].

3.1 Caratterizzazione energetica

3.1.1 I parametri per la valutazione energetica

I parametri per la valutazione energetica di un componente edilizio descrivono il comportamento dell'elemento di involucro dal punto vista fisico tecnico. Si distingue tra parametri prestazionali *stazionari* e *dinamici*. In condizioni stazionarie l'unico elemento che influisce sulla trasmissione del calore è la resistenza termica degli strati che compongono l'elemento dell'involucro. La prestazione di un componente di involucro opaco o trasparente è quindi descritta tramite :

- la trasmittanza termica U [$W/(m^2K)$]
- fattore solare $g/TSET/SHGC$ $[-]$

In regime dinamico oltre ai fenomeni resistivi si aggiungono i fenomeni dovuti all'accumulo termico nei vari strati che compongono l'elemento di involucro. Per questo motivo si caratterizza il componente tramite:

- la capacità termica frontale CF [kJ/m^2K]
- la trasmittanza termica periodica Y_{ie} [$W/(m^2K)$]
- il fattore di attenuazione f_a $[-]$
- lo sfasamento φ [h]

La legislazione italiana in materia energetica introduce con il D.R.P. 59 del 2 aprile del 2009 la verifica della trasmittanza termica periodica calcolata secondo il metodo della UNI EN ISO 13786:2008 [8], solo per alcune zone climatiche e con elevati valori di irraggiamento solare art. 4 comma 18, per i componenti di involucro opachi orizzontali e verticali. La verifica può andare in deroga sui componenti verticali se si verifica il limite di massa superficiale o nel caso di utilizzo di tecniche definite innovative come le coperture a verde. Relativamente alle tecnologie innovative nell'appendice della norma UNI EN ISO 13790 [9], Annex E sono riportati dei metodi di calcolo semplificati per diverse tipologie di tecnologie di involucro edilizio definite "speciali"; serra non riscaldata, elementi di involucri opachi con isolamento trasparente, muri solari ventilati (muro di Trombe-Michel) ed elementi di involucro ventilati.

Dal punto di vista normativo sono presenti delle lacune legislative per quanto concerne le nuove tecnologie di involucro edilizio caratterizzate da un comportamento dinamico e responsivo. Non sono presenti gli strumenti normativi che facilitino lo sviluppo e l'utilizzo di componenti e di sistemi dinamici.

Il Comitato Termotecnico Italiano CTI gl 102 ha in programma una norma per il 2015 sulle simulazioni dinamiche dove dovrebbero essere introdotti i parametri di input ai modelli.

L'involucro trasparente è caratterizzato dal punto di vista fisico tecnico tramite la trasmittanza termica e il fattore solare. L'ente ISO "*International Organization for Standardization*" iniziò a lavorare sulla definizione della trasmittanza termica U-value dei componenti vetrati dagli anni '80. Il risultato del lavoro è la norma ISO 10077-1:2006, *Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance*.

Nella norma viene definita la trasmittanza termica della finestra U_w nel paragrafo 5.1.1 come :

$$U_w = \frac{\Sigma A_g U_g + \Sigma A_f U_f + \Sigma \psi_g l_g}{\Sigma A_g + \Sigma A_f} \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (3.1)$$

La trasmittanza termica del vetro è definita nel paragrafo 5.2.1 come:

$$U_g = \frac{1}{R_{se} + \Sigma \frac{d}{\lambda} + R_{si}} \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (3.2)$$

Nell'annex B viene riportato il valore di conducibilità termica del vetro pari a 1 W/(mK) . Con la guida del CEN (European Committee for Standardization) viene sviluppata la norma ISO 10077-2:2012, Thermal performance of windows, doors and shutters -Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames [4]. Nella norma viene riportato un metodo per il calcolo bi-dimensionale della trasmittanza termica dei profili del telaio. [27].

Negli anni '90 prima l'ASHRAE e poi l'ISO, iniziarono a sviluppare un documento generale che comprendesse i due metodi di calcolo (mono-dimensionale e bi-dimensionale). L'ISO sviluppa la norma ISO 15099:2003 *Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations* [11], mentre l'ASHRAE la norma SPC 142 Standard, *Method for Determining and Expressing the Heat Transfer and Total Optical Properties of Fenestration Products*, Public Review Draft of Standard 142P, 1998, Special Project Committee. Alcune analisi mostrano che la differenza tra i due metodi è minima. La differenza massima che si è riscontrata calcolando la trasmittanza termica della finestra con i due metodi è del 3 % [27].

Il fattore solare ($g - \text{value}/TSET/SHGC$) viene calcolato come la somma del fattore di trasmissione solare diretta τ_s e del fattore di scambio termico secondario della vetrata verso l'interno q_i (secondo ISO 10292:1994, UNI EN 410:2011, ISO 9050:2003) [5],[12],[14]. La quota q_i è il flusso di calore trasmesso per convezione e per irraggiamento nel lontano IR della frazione della radiazione solare incidente che è stata assorbita dalla vetrata:

$$g = \tau_s + q_i \quad [-] \quad (3.3)$$

Il coefficiente di trasmissione solare τ_s è definito (secondo la ISO 15099:2003) come la differenza del flusso netto entrante in ambiente in presenza di radiazione solare (q_{int}) e in assenza di radiazione solare ($q_{int}(I_s = 0)$):

$$\tau_s = \frac{q_{int} - q_{int}(I_s = 0)}{I_s} \quad [-] \quad (3.4)$$

Attraverso la trasmittanza termica della finestra (Uw) e il fattore solare (g) è quindi possibile caratterizzare il comportamento termico di un elemento trasparente. La trasmittanza termica definisce il flusso termico che attraversa l'elemento per metro quadro, per differenza di temperatura in assenza di radiazione solare, infiltrazioni d'aria e condensa.

Mentre il fattore solare definisce gli apporti solari attraverso l'elemento trasparente. La normativa italiana prevede di verificare e caratterizzare il comportamento dei sistemi vetrati attraverso un valore di trasmittanza termica e un valore del fattore solare per incidenza della radiazione solare perpendicolare alla sua superficie. La verifica dei parametri dinamici per l'involucro trasparente non è prevista, infatti i componenti trasparenti tradizionali non presentano valori di capacità termica elevati (calore specifico del vetro in media $800 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$).

Il comportamento fisico tecnico dei componenti di facciata dinamici e dei sistemi di facciata attivi è alquanto complesso, perché varia in funzione delle condizioni al contorno. Le proprietà ottico e solari dei vetri dipendono dall'angolo di incidenza della radiazione solare tra la superficie del vetro e il raggio solare: quando l'angolo non è normale ($\neq 0$), il coefficiente di trasmissione decresce, quello di riflessione di assorbimento aumentano [21]. Conseguentemente

nel caso di una facciata attiva il valore del fattore solare oltre che variare in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare cambia durante il giorno in funzione della portata d'aria che fluisce nell'intercapedine e alla posizione della schermatura. Nel caso di componenti dinamici come elementi vetrati con integrazione di PCM il comportamento del componente è influenzato anche dagli effetti capacitivi del materiale a cambiamento di fase.

3.1.2 Esempi di applicazione dei parametri per la valutazione energetica

La ricerca sul tema dei parametri prestazionali è attuale e dall'analisi bibliografica è emerso che alcuni autori tendono ancora ad utilizzare i parametri prestazionali tradizionali per caratterizzare i sistemi di facciata dinamici come dimostrato da alcuni studi di H. Manz [61]. Le proprietà ottiche e solari dei materiali a cambiamenti di fasi cambiano in funzione dello stato di aggregazione del materiale. Alcuni studi presentano i risultati sperimentali dell'applicazione dei materiali a cambiamento di fase in componenti trasparenti utilizzando i parametri prestazionali tradizionali (τ , ρ e α) per lo stato solido e liquido [51],[50].

Nel lavoro di *Ismail et al.* [55] viene analizzata la prestazione di un vetro con materiale a cambiamento di fase. Nell'articolo si introduce il parametro F definito come "*coefficient of heat gain*", che rappresenta la quota di radiazione solare assorbita dal componente e rimessa in ambiente (il q_i del g vedi equazione 3.3). Definito come:

$$F = \tau + \alpha_1 \cdot \frac{U}{h_{ext}} + \alpha_2 \cdot \left(\frac{U}{h_{ext}} + \frac{U}{h_{gap}} \right) \quad (3.5)$$

Dove si indica con:

- τ la trasmissione solare attraverso il vetrocamera,
- α_1 e α_2 i coefficienti di assorbimento dei due vetri,
- U la trasmittanza termica del componente [W/m^2K],
- h_{gap} il coefficiente liminare tra il PCM e il vetro [$W/(m^2K)$].

Dirk Saelens nella sua tesi di dottorato introduce il fattore solare equivalente (*equivalent g-value*) per le facciate attive e il fattore di trasmittanza equivalente (*equivalent U-factor*) [81]. Gli indicatori equivalenti sono utilizzati nel suo lavoro per simulare la prestazione energetica di un edificio con la tecnologia di facciata attiva tramite un modello di calcolo. Nel lavoro i parametri prestazionali tradizionali (U e g) sono utilizzati e indicati solo per le verifiche termiche locali mentre per simulare il comportamento della facciata e la prestazione globale dell'edificio con quella tecnologia sono introdotti i due indicatori equivalenti:

$$U - \text{equivalente} = \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{ti - te} \int_0^H ti - tj(z) \cdot dz [W/(m^2K)] \quad (3.6)$$

$$g - \text{equivalente} = \frac{1}{Is} \cdot \left(\tau_s \cdot Is + \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{R} \cdot \int_0^H \theta_j \cdot dz \right) [-] \quad (3.7)$$

Dove si indica con:

- H l'altezza della facciata in metri $[m]$,
- R la resistenza termica del vetro interno $C [(m^2K)/W]$,
- $t_j(z)$ è la temperatura superficiale interna in funzione dell'altezza $[K]$,
- $t_i - t_e$ è la differenza di temperatura dell'aria interna ed esterna $[K]$.

La trasmittanza termica equivalente in una facciata attiva è dunque funzione del flusso d'aria che fluisce nell'intercapedine, della posizione della schermatura nell'intercapedine e chiaramente della tipologia di pelli vetrate che costituiscono il sistema. Nel suo lavoro presenta i risultati relativi alla trasmittanza termica equivalente di un sistema di facciata con ventilazione meccanica in intercapedine Climate Façade (CF). La temperatura dell'aria immessa in intercapedine (temperatura inlet) viene imposta uguale a quella dell'aria interna. Nel grafico in figura ?? è possibile vedere che il valore della trasmittanza equivalente varia in funzione della portata d'aria in intercapedine. I valori calcolati variano tra 0,18 e 0,60 $W/(m^2K)$ per portate d'aria tra i 200 e i 10 $m^3/(h \cdot m)$. All'aumentare della portata d'aria in intercapedine la trasmittanza termica equivalente si riduce. La temperatura dell'aria immessa in intercapedine influisce sul valore di trasmittanza termica equivalente; la trasmissione del calore in intercapedine infatti varia linearmente con la temperatura dell'aria di immissione. Per temperature dell'aria di immissione in intercapedine maggiori di 21°C si calcolano valori di trasmittanza termica negativi. L'autore conclude affermando che a livello di bilancio di edificio un'elevata portata d'aria in intercapedine riduce la trasmittanza termica del sistema, ma non porta ad una riduzione della richiesta di energia dell'edificio per riscaldamento. Infatti le perdite dovute al flusso entalpico sono maggiori della riduzione di flusso termico trasmesso.

Il fattore solare equivalente della facciata varia in funzione della quantità di calore asportata dall'aria di ventilazione nell'intercapedine. Nel caso di una facciata a doppia pelle con ventilazione naturale il parametro è influenzato dalle condizioni al contorno che determinano la ventilazione naturale nell'intercapedine. Per il calcolo del parametro secondo l'equazione 3.10, si ipotizza che non ci sia differenza di temperatura tra interno ed esterno e si considera dunque il solo effetto della radiazione solare. In figura ?? è rappresentato il valore del fattore solare equivalente al variare dell'angolo di inclinazione della radiazione solare e della portata dell'aria in intercapedine.

M.E. Mc Evoy et al. (2003) [64] propone un metodo per valutare la trasmittanza equivalente di una finestra supply air. Il principio di funzionamento di questo componente può essere confrontato con quello di una facciata a doppia pelle a scala maggiore. Attraverso l'analisi sperimentale e la validazione di un modello di calcolo, nel lavoro vengono definiti: il fattore solare e la trasmittanza termica della tecnologia studiata. Il fattore solare e la trasmittanza termica della finestra sono divise in due parti:

- la quota relativa alla rimozione del calore dall'aria di ventilazione dell'intercapedine g_{vent} e U_{vent} che diventano rispettivamente $g \cdot A_{vent}$ e $U \cdot A_{vent}$,
- la quota che caratterizza il vetro della finestra g_{trans} e U_{trans} .

L'equazione di bilancio del calore rimosso dall'aria in intercapedine in presenza di radiazione solare è pari a :

$$\dot{Q}_{vent} = c_p \cdot \dot{m} \cdot (t_{out} - t_{in}) = U \cdot A_{vent} \cdot (t_r - t_{in}) + g \cdot A_{vent} \cdot I_s \quad (3.8)$$

Dove con c_p si indica il calore specifico dell'aria $J/kg^\circ C$, con \dot{m} la portata d'aria in kg/s . Gli autori scrivono l'equazione di bilancio della finestra come: il flusso termico che esce dalla finestra è uguale al flusso termico sul lato interno della finestra meno il flusso termico rimosso per ventilazione.

$$\dot{Q}_{winext} = \dot{Q}_{winint} - \dot{Q}_{vent} \quad (3.9)$$

Conseguentemente è possibile scrivere l'equazione della trasmittanza termica della finestra come:

$$U_e = \frac{\dot{Q}_{winint} - c_p \cdot \dot{m} \cdot (t_{out} - t_{in})}{A \cdot (t_r - t_{ext})} \quad (3.10)$$

Il valore di \dot{Q}_{winint} è stato misurato durante una campagna sperimentale e utilizzato per validare il modello. I risultati mostrano che il valore di trasmittanza termica della finestra varia in funzione della portata d'aria in intercapedine e del valore della temperatura dell'aria esterna.

3.2 Caratterizzazione acustica

Il comfort acustico di un ambiente confinato è determinato da due fattori: l'isolamento acustico dai rumori provenienti dall'esterno o da ambienti adiacenti e la buona ricezione del suono. Nel lavoro di ricerca si affronta solo il primo tema, con particolare attenzione al potere fonoisolante ai rumori per via aerea degli elementi di chiusura verticale dell'involucro edilizio trasparente. Quando una struttura di separazione tra ambiente confinato ed esterno viene investita dalle onde sonore prodotte da una sorgente sonora all'esterno entra in vibrazione e irradia l'energia sonora verso l'ambiente [40]. Il potere fonoisolante definisce la proprietà di isolamento acustico di un elemento di separazione fra due ambienti, è espresso in decibel e definito dalla relazione [40]:

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) \quad (3.11)$$

Con t si indica il coefficiente di trasmissione della partizione, pari al rapporto tra la potenza sonora (W_2) irradiata verso l'ambiente interno (ambiente disturbato) e quella incidente sul lato esposto alla sorgente sonora disturbante (W_1).

$$t = \frac{W_2}{W_1} \quad (3.12)$$

Il potere fonoisolante descrive quindi l'attitudine di una struttura a ridurre la trasmissione di energia sonora ed è caratteristico della tecnologia. Il suo valore dipende dalle proprietà dell'elemento come densità, geometria e vincolo perimetrale, dalle caratteristiche del suono e del campo sonoro. Il potere fonoisolante apparente R' viene definito:

$$R' = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2 + W_l} \right) \quad (3.13)$$

Dove con W_l si intende la potenza sonora che arriva nell'ambiente disturbato a causa delle trasmissioni laterali.

L'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w o del potere fonoisolante apparente R'_w sono calcolati con il metodo presentato dalla norma EN 717-1. Il pedice w (weighted, pesato) indica che si caratterizza l'elemento di separazione verticale attraverso un unico valore. Il metodo prevede di confrontare i valori del potere fonoisolante R per frequenza con una curva di riferimento opportunamente pesata. Il valore a 500 Hz corrisponde al valore dell'indice di valutazione.

La differenza tra il livello sonoro misurato all'esterno e quello rilevato all'interno dell'ambiente è definito isolamento acustico (D), in Decibel:

$$D = L_{p1} - L_{p2} \quad (3.14)$$

3.2.1 Esempi di caratterizzazione acustica

Urbán et al. [89] hanno lavorato sulla valutazione acustica di sistemi di facciata trasparenti e sulle difficoltà di caratterizzare il comportamento di questi sistemi in opera. Nel suo lavoro [89] sono presentati i risultati di misure acustiche condotte con il metodo della UNI EN ISO 140-5 [10] su di un edificio con FTA. Nella figura ?? sono riportati i grafici dei valori di $D_{nT,w}$ calcolati dai dati misurati. Le misure sono state condotte con la finestra della doppia pelle aperta (mode 3) e chiusa (mode 4 e 5) al fine di verificare l'effetto della seconda pelle sulle riflessioni delle onde sonore in intercapedine.

Dall'analisi dei dati emerge che i valori calcolati per la modalità del test 3 (finestra aperta) sono sempre inferiori rispetto alla modalità 4 e 5. Solo per alcune basse frequenze i valori delle tre misure sono vicini. In particolare questo si registra tra le frequenze di 160 Hz e 250 Hz. Gli autori interpretano questo fenomeno dovuto alle onde stazionarie che si formano nell'intercapedine. Infine la pelle esterna è responsabile di una riduzione del livello tra i 5 e i 5,5 dB (ΔL).

3.3 Caratterizzazione luminosa

Un ambiente illuminato naturalmente presenta condizioni di comfort luminoso se il livello di illuminamento in ambiente è sufficiente per svolgere il compito visivo e se non si verificano fenomeni di abbagliamento. Secondo la UNI 10840 del 2007 [6], l'illuminazione naturale deve essere utilizzata nella maggiore misura possibile al fine di favorire il benessere psico-fisico degli occupanti e ridurre il consumo energetico. La norma UNI EN 12464-1:2004 [7] fornisce le indicazioni per valutare il comfort visivo e la prestazione visiva dei posti di lavoro.

Limitandoci alla caratterizzazione del comfort luminoso dell'ambiente in funzione dell'involucro trasparente e tralasciando quindi le caratteristiche spaziali e colorimetriche dell'ambiente, l'illuminamento in un ambiente per luce naturale è funzione del *coefficiente di trasmissione luminosa* del vetro. Questo coefficiente definisce la quantità di radiazione visibile trasmessa dall'elemento trasparente. Il coefficiente di trasmissione luminosa (τ_l o τ_v) è definito nella EN 410:2000 come:

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780} D_{\lambda} \cdot \tau_{\lambda} \cdot V_{\lambda} \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{780} D_{\lambda} \cdot V_{\lambda} \cdot \Delta\lambda} \quad (3.15)$$

Dove:

D_λ è la distribuzione spettrale relativa dell'illuminante D_{65} ,

τ_λ è il fattore di trasmissione spettrale della vetrata,

V_λ è il fattore di visibilità spettrale della visione fotopica che definisce l'osservatore normalizzato per la fotometria,

$\Delta\lambda$ è l'intervallo di lunghezze d'onda.

Il calcolo prevede l'integrazione dei valori nelle lunghezze d'onda del visibile (380-780 nm) utilizzando come funzione di pesatura la curva di sensibilità dell'occhio e lo spettro solare D_{65} . Il coefficiente di trasmissione luminosa rappresenta dunque il rapporto tra il flusso luminoso trasmesso e quello incidente.

3.3.1 Esempi di caratterizzazione luminosa

Nel lavoro di *Kim e Todorovic* [57] sono analizzati i modelli di calcolo e le ultime ricerche sul tema dei parametri luminosi di sistemi e componenti innovativi trasparenti. Nell'articolo sono presentate diverse soluzioni innovative di tecnologie trasparenti, tra cui facciate con sistemi bio-mimetici per la schermatura solare e tecnologie trasparenti *switchable*. In particolare per queste ultime viene definito la proprietà ottica p che corrisponde alla trasmissione o assorbimento della lastra e viene definita come:

$$p = (1 - f_{switch}) \cdot p_{light} + f_{switch} \cdot p_{dark} \quad (3.16)$$

Dove con f_{switch} si indica il fattore di attivazione della tecnologia e sarà un valore che varia tra 0 e 1, in funzione dello stato del componente. Con p_{light} si indica il valore del coefficiente allo stato attivo e con p_{dark} allo stato non attivo. Nel lavoro si evidenzia l'importanza di utilizzare tecnologie con un comportamento dinamico per il risparmio energetico e l'ottimizzazione della luce naturale in ambiente, il cui comportamento deve essere descritto attraverso appositi parametri.

3.4 Indici di valutazione del comfort ambientale

In questo paragrafo si affrontano gli indici per valutare il comfort termico e luminoso a livello di ambiente, caratterizzando l'analisi dei parametri dal punto di vista dell'involucro trasparente. Trattando il comfort ai fini della sua stretta interrelazione con gli aspetti energetici l'attenzione è concentrata sul comfort termico e luminoso.

Il comfort termico. Le condizioni di comfort termico in un ambiente confinato moderato sono valutate della norma UNI EN ISO 7730/2006 [13]. Le condizioni di benessere termico di un utente sono definite tramite l'indice PMV, voto medio previsto, e il PPD, percentuale di utenti insoddisfatti. I parametri PMV e PPD valutano le condizioni di comfort termico globali dell'utente tramite il bilancio energetico del corpo umano. L'indice PMV derivante dalla teoria di Fanger (1970) fornisce un'indicazione delle condizioni termiche di un ambiente, in funzione dell'attività svolta e dell'abbigliamento indossato dall'utente.

$$PMV = [0,303^{(-0,036 \cdot M)} + 0,028] \cdot L \quad (3.17)$$

Dove con M si indica l'indice di attività metabolica in W/m^2 e con L il carico termico sull'utente. Il PPD è l'indice che stabilisce la percentuale di utenti insoddisfatti dal comfort termico di un ambiente perché troppo caldo o freddo e si calcola partendo dal PMV come:

$$PPD = 100 - 95^{(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (3.18)$$

Tramite questo indice non è possibile caratterizzare dal punto di vista del comfort termico un solo componente dell'edificio come ad esempio una parete o un componente trasparente.

La norma introduce altri parametri in grado di valutare le condizioni di discomfort termico locale. In particolare per il discomfort locale la norma definisce:

- il DR, il rischio di discomfort dovuto a corrente d'aria
- la PD, la percentuale di utenti insoddisfatti a causa di una differenza di temperatura verticale (tra le caviglie e la testa)
- la PD, la percentuale di utenti insoddisfatti a causa del pavimento o del soffitto caldo o freddo
- la PD, la percentuale di utenti insoddisfatti a causa di discomfort per asimmetria radiante

Per quel che riguarda i sistemi e i componenti trasparenti il tema del comfort è stato sviluppato prevalentemente dai ricercatori del CBE, Berkley California. Dalle loro analisi emerge che i maggiori rischi di discomfort termico derivano [32]:

- dalla radiazione solare trasmessa attraverso il sistema trasparente,
- dallo scambio termico radiativo tra l'occupante e le superfici trasparenti,
- dai moti convettivi indotti dalla differenza di temperatura tra la superficie del vetro e l'aria in ambiente.

Le condizioni di comfort termico in un ambiente con pareti vetrate non può essere definito solo con l'indice PMV che non considera il contributo della radiazione solare incidente sull'utente. Infatti un elemento vetrato trasmette e assorbe una parte significativa della radiazione solare che incide sul componente. La parte assorbita contribuisce all'aumento di temperatura superficiale dell'elemento (fino a 50°C in estate [32]) e ad un conseguente aumento della temperatura media radiante. L'utente se colpito dalla componente di radiazione solare trasmessa in ambiente può essere soggetto ad un aumento della sua temperatura media radiante in modo non uniforme fino a 11°C [17]. La radiazione solare a bassa lunghezza d'onda è responsabile di condizioni di discomfort se incidente direttamente sull'utente e indirettamente per il riscaldamento dell'aria in ambiente.

Per considerare l'effetto della radiazione solare incidente sull'utente si è provato a trasformare il carico solare in carico termico e inserirlo quindi nel termine L dell'equazione 3.17 del calcolo del PMV.

Alternativamente *Arens et al.* (1986) calcolano un valore di temperatura media radiante equivalente che tiene conto anche del contributo della radiazione

solare [17] introducendo il parametro ERF (Effective Radiation Field). Secondo l'equazione 3.19 viene definita la quantità di flusso termico scambiata dal corpo umano dell'utente con le superfici dell'ambiente che si trovano ad una temperatura diversa da quella dell'aria.

$$ERF = [f_{eff} \cdot h_r \cdot (MRT - T_a)] \quad (3.19)$$

Tramite il parametro f_{eff} si considera la frazione del corpo dell'utente esposto alla radiazione solare con h_r il coefficiente di scambio termico radiativo, MRT la temperatura media radiante e T_a la temperatura dell'aria.

Sullivan (1986) effettua una linearizzazione dell'indice PMV considerando l'effetto della radiazione solare.

Lyons (1999) [60] partendo dal lavoro di *Arens e Sullivan* calcola il valore del PPD quando la radiazione solare colpisce l'utente ???. Il PPD è calcolato come la somma del voto in assenza e in presenza di radiazione solare. Dal lavoro di *Lyons* è possibile definire un nuovo indice il PMV*.

Il PMV* descrive l'aumento del voto medio previsto per ogni Watt al metro quadro di radiazione solare incidente sull'utente (equazione 3.20).

$$PMV^* = PMV + 0,0024 \cdot I_{sol} \quad (3.20)$$

Dove con I_{sol} si indica la radiazione solare trasmessa dall'elemento vetrato. Il metodo del PMV tratta il corpo umano come un elemento a temperatura uniforme. Tramite questo metodo non è dunque possibile valutare condizioni di discomfort termico locale dovute all'incidenza della radiazione solare su parte dell'utente. Per edifici con superfici vetrate o finestre, la radiazione solare trasmessa nell'ambiente, può essere causa di discomfort locale. L'università di Berkley ha sviluppato un modello in grado di definire le condizioni di discomfort locali di un utente in un ambiente vetrato [32]. Dal confronto tra i risultati del modello e i valori calcolati di PMV emerge che l'indice di Fanger è insensibile a condizioni di discomfort locali.

Il comfort luminoso. Nel lavoro di ricerca si tratta il tema del comfort luminoso per la sola illuminazione naturale. Per valutare l'illuminazione naturale di un ambiente esistono due indici sintetici:

- il fattore di luce diurna
- il coefficiente di utilizzazione

Il metodo del *fattore di luce diurna* è attualmente raccomandato dalla CIE (1972) per il calcolo dell'illuminazione naturale all'interno di un ambiente. L'indice FLD è il Fattore di luce Diurna (DF Daylight Factor) formulato da *Waldram* (1944) [52]:

$$FLD = \frac{E_i}{E_o} \quad (3.21)$$

L'indice è definito come: il rapporto tra l'illuminamento che si ha in un punto dell'ambiente per effetto dell'illuminazione dovuta alla sola componente diffusa (ipotesi di cielo uniformemente coperto) ricevuta da un cielo di nota distribuzione di luminanza, in assenza di ostruzioni, e l'illuminamento che, nello stesso istante, si avrebbe su una superficie orizzontale esposta all'aperto e schermata dall'irraggiamento solare diretto [52]. L'illuminamento che si legge su un

punto interno di un ambiente è caratterizzato dalla componente di radiazione luminosa trasmessa dall'elemento vetrato e dalla quota riflessa dalle pareti dell'ambiente. Attualmente questo è l'unico indice adottato dalle norme tecniche e dalla legislazione sull'illuminazione naturale. La definizione di questo parametro implica, però, un insieme di semplificazioni del fenomeno reale che lo rendono poco rappresentativo qualora si voglia quantificare l'effettiva disponibilità di luce naturale nell'arco del giorno e dell'anno. L'indice non considera il contributo della radiazione solare diretta, della localizzazione geografica e dell'orientamento dell'edificio e dell'eventuale presenza di schermature solari.

Il *metodo del coefficiente di utilizzazione* (lumen method) è particolarmente diffuso negli Stati Uniti e parte dal principio che il valore di illuminamento che si legge su una superficie interna è funzione del valore che si legge sull'elemento trasparente. Il metodo deriva dalla raccolta di dati sperimentali e può quindi essere applicato solo per determinate geometrie e casi.

La ricerca sugli indici per l'illuminazione naturale degli ambienti tende verso parametri dinamici per simulazioni dell'ambiente studiato con dati climatici annuali i *Climate Based Daylight Modelling* (CBDMM). La ricerca si sta spostando dagli indici statici (come il fattore di luce diurna) verso indici calcolati con dati climatici reali specifici per le diverse stagioni e posizioni geografiche. Tra i nuovi parametri dinamici per la luce naturale (DDS Dynamic Daylight Performance Metrics) si sono formulati [76]:

- Daylight Autonomy (DA), è la percentuale di ore in cui la luce naturale è in grado di mantenere il livello di illuminamento richiesto sul piano di lavoro [77]
- Useful Daylight Illuminances (UDI) indica la percentuale di tempo in cui la luce naturale risulta "utile" in relazione al compito visivo svolto dall'utente [67]. La percentuale delle ore di lavoro possono essere divise in tre categorie, in funzione dei valori di illuminamento sul piano utile:
 - < 100 lux (illuminamento insufficiente),
 - comprese tra 100 lux e 2000 lux (illuminamento utile),
 - > 2000 lux (disponibilità eccessiva di luce naturale, potenziale causa di discomfort visivo e/o termico).
- Continuous DA e DA_{max} definiscono il contributo sotto forma di crediti, della luce naturale per il raggiungimento del requisito di illuminamento di un ambiente. Il DA_{max} indica la percentuale di tempo in cui il valore di illuminamento è maggiore del requisito in ambiente e quindi determina un potenziale rischio di discomfort da abbagliamento [94].
- Annual Light Exposure rappresenta la quantità cumulata di flusso luminoso incidente su una superficie nell'arco di un anno [$lxh/anno$].

I principali limiti dell'approccio degli indici dinamici deriva dalla quantità di dati di output della simulazione variabili nel tempo, inoltre ad oggi gli indici sono solo stati applicati tramite simulazioni numeriche.

In un ambiente confinato possono insorgere fenomeni di discomfort visivo a causa dell'abbagliamento, generato dalla presenza di elevati gradienti di luminanza. Secondo la norma UNI EN 12464-1:2004 [7] la distribuzione delle

luminanze nel campo visivo influenza il livello di adattamento degli occhi che a sua volta influenza la visibilità del compito e il comfort visivo. La luminanza è definita come il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una superficie in una determinata direzione, e la proiezione della superficie stessa sul piano perpendicolare alla direzione di osservazione. Si misura in candele al metro quadro (cd/m^2) [97]. Nel caso di illuminazione naturale ciò che provoca abbagliamento è la superficie vetrata [97].

Per valutare gli effetti dell'abbagliamento causati dall'illuminazione naturale si utilizza l'indice *DGI* (*Discomfort Glare Index*) definito nella norma UNI 10840:2000 [6] come:

$$DGI = 10 \log \sum_{i=1}^n G_i \quad (3.22)$$

G_i è la costante di abbagliamento calcolata per ciascuna porzione di sorgente, primaria e secondaria, vista attraverso la finestra (cielo, ostruzioni, terreno), ricavata attraverso misure sperimentali con sorgenti artificiali. Si calcola secondo:

$$G_i = \frac{L_s^{1,6} \cdot \Omega^{0,8}}{L_b + 0,07 \cdot \omega^{0,5} \cdot L_w} \quad (3.23)$$

Dove:

L_s è la luminanza della sorgente in (cd/m^2),

ω è l'angolo solido sotteso dalla sorgente (primaria o secondaria) corretto in relazione alla direzione di osservazione in steradiani (sr),

L_b è la luminanza media delle superfici interne dell'ambiente, che rientrano nel campo visivo dell'occupante in (cd/m^2),

ω è l'angolo solido totale sotteso dalla finestra in steradiani (sr),

L_w è la luminanza media della finestra, ponderata rispetto alle aree relative di cielo, ostruzione e terreno in (cd/m^2).

La norma indica inoltre i valori limite del DGI in base ai compiti svolti nell'ambiente e la scala di percezione dell'abbagliamento da 16 a 28 DGI che corrispondono rispettivamente ad una sensazione di abbagliamento appena percepibile e intollerabile. Oltre al DGI sono presenti in letteratura numerosi altri indici per la valutazione del discomfort luminoso basati sulla costante di abbagliamento G_i .

Relativamente all'abbagliamento un nuovo indice è stato introdotto da Wienold and Christoffersen, (2006) il DGP, Daylight Glare Probability [92]. Gli autori hanno dimostrato attraverso una campagna sperimentale la scarsa capacità predittiva dell'indice DGI di condizioni di discomfort visivo causate da abbagliamento. Con il nuovo indice è possibile calcolare la percentuale di persone che si trovano in condizioni di discomfort da abbagliamento in un ambiente adibito ad ufficio schermato con tende veneziane. La percentuale si calcola conoscendo la posizione dell'utente, la dimensione e la luminanza della sorgente secondo:

$$DGP = 5,87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 9,18 \cdot 10^{-2} \log \left(1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{E_v^{1,87} \cdot P_i^2} \right) + 0,16 \quad (3.24)$$

Dove con :

E_v si intende l'illuminamento verticale al livello dell'occhio dell'utente in [lux]

$L_{s,i}^2$ la luminanza della sorgente in $[cd/m^2]$

$\omega_{s,i}$ l'angolo solido della sorgente $[sr]$

P è la posizione della sorgente ed è funzione della posizione della sorgente rispetto alla linea visuale dell'utente.

L'indice DGPs è una versione semplificata dell'indice DGP, è definito dagli autore come:

$$DGP_s = 6,22 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 0,184 \quad (3.25)$$

I limiti di questo nuovo indice derivano dallo scenario limitato dei casi sperimentali su cui si è calcolato il parametro. L'indice è stato validato solo per valori compresi tra il 20% e l'80% infatti al di fuori di questo range difficilmente si verificano condizioni di discomfort da abbagliamento.

Il tema del comfort luminoso nelle facciate FTA è stato studiato meno rispetto agli aspetti termici come riscontra *Shameri et al.* [86] nel suo lavoro di ricerca sullo stato dell'arte dei sistemi FTA. In un altro lavoro dello stesso autore [85], dodici edifici con tecnologie FTA sono stati simulati in diversi climi per verificare il fattore di luce diurna (Daylight Factor). I risultati delle simulazioni hanno mostrato che nessuno degli edifici presentava valori di fattore di luce diurna superiori o uguali al 2 % su una superficie di pavimento superiore al 75% e quindi in nessuno caso si soddisfaceva il requisito illuminotecnico. Allo stesso tempo in nessun caso si sono calcolate condizioni di discomfort causate dall'abbagliamento.

Capitolo 4

Modelli di calcolo

Un modello di calcolo per la simulazione termica ha lo scopo di descrivere i fenomeni fisici che avvengono nel sistema o nel componente trasparente attraverso un'espressione matematica [39].

Nel capitolo si analizza lo stato dell'arte dei modelli di calcolo per valutare la prestazione termica di:

- componenti trasparenti,
- sistemi di facciata trasparenti.

Il tema dei componenti di facciata con integrazione di materiali a cambiamento di fase è approfondito nel lavoro di ricerca, solo dal punto di vista dell'analisi sperimentale e non a livello della modellazione. Nel capitolo sono comunque riportati i principali riferimenti dei modelli di calcolo di componenti trasparenti con materiali a cambiamento di fase.

Nel primo paragrafo 4.1 si affrontano i modelli per valutare le prestazioni energetiche, ottico e solari dei componenti trasparenti mentre nel secondo sono analizzati (4.2) i modelli per simulare la prestazione energetica di sistemi di facciata trasparenti che come evidenziato da *De Gracia et al.* [39] stanno diventando essenziali per la fase di progettazione.

I modelli di calcolo per i sistemi di facciata sono stati divisi in due categorie, semplificati e avanzati corrispondenti a due diverse fasi di applicazione nel progetto; quella preliminare per i modelli semplificati e quella definitiva per quelli avanzati. La principale distinzione dal punto di vista fisico tecnico è il numero di nodi e quindi i punti di calcolo in cui si divide la facciata.

4.1 Modelli per componenti di facciata trasparenti

A livello di componente trasparente in nord America tra gli anni '80 e '90 vengono sviluppati due modelli per il calcolo della trasmittanza termica di una finestra WINDOW (USA attualmente alla settima edizione) e VISION (Canada). Successivamente per la valutazione del telaio vengono sviluppati FRAME (Canada) e Therm (LBL, 1999).

WINDOW è uno strumento di calcolo per determinare le prestazioni termiche e solari di componenti trasparenti sviluppato dal LBL dell'Università della California, Berkley. I risultati di WINDOW possono essere accoppiati con quelli di Therm che calcola le prestazioni del telaio per avere le prestazioni globali del sistema finestra. Gli algoritmi di calcolo di WINDOW e THERM seguono la procedura presentata nella norma ISO 15099.

Il principio di calcolo del software prevede di assimilare a due nodi resistivi ogni strato che compone la parte trasparente. Si assume che ogni lastra sia caratterizzata da due temperature superficiali lato interno ed esterno e che il flusso termico uscente sia uguale a quello entrante. La resistenza termica dei nodi è calcolata come l'inverso dei coefficienti liminari di scambio termico convettivo/conduittivo e radiativo. I coefficienti di scambio termico interno ed esterno sono ricavati dalle relazioni empiriche, mentre per il coefficiente di scambio termico convettivo in intercapedine il software utilizza il numero di Nusselt. Lo scambio termico radiativo tra i nodi è calcolato secondo la relazione di Stefan-Boltzmann in funzione dell'emissività emisferica della superficie e della temperatura. Inoltre è possibile modellare componenti trasparenti con sistemi di schermatura, in intercapedine, esterni o interni. Il calcolo è di tipo iterativo, monodimensionale e avviene in condizioni stazionarie. Il modello restituisce i valori di trasmittanza termica e fattore solare del componente calcolati al centro della specchiatura. Il software restituisce il valore di trasmittanza termica del pacchetto vetrato calcolato come l'inverso delle resistenze termiche dei nodi in assenza di radiazione solare.

Le proprietà ottico e solari dei sistemi trasparenti sono calcolate per ogni lunghezza d'onda per determinare correttamente le proprietà dei vetri selettivi. Il modello calcola la trasmissione e la riflessione per ogni lunghezza d'onda. I file di input dei sistemi vetrati e delle schermature devono fornire valori spettrali delle proprietà ottico e solari dei vetri.

Grazie al plug-in *Optics* è possibile costruire componenti trasparenti laminati non presenti nella libreria e calcolare le proprietà ottico e solari del sistema per le diverse lunghezze d'onda.

Nell'ultima versione di WINDOW la banca dati dei vetri e delle schermature è stata allargata a componenti dinamici e innovativi. La nuova libreria del software mette a disposizione diverse tipologie di vetri termocromici ed elettrocromici. Per i vetri termocromici il software propone i valori delle proprietà del vetro in funzione della temperatura del vetro e nel calcolo del pacchetto è possibile specificare la temperatura in cui il materiale si attiva. Negli output vengono forniti i valori dei coefficienti di trasmissione, riflessione e assorbimento (nel campo del visibile e del solare) per le diverse temperature superficiali del vetro come rappresentato nella figura 4.2. Invece per i vetri elettrocromici il software fornisce due set di parametri per la condizione light e dark, per quando il componente è attivato o meno.

Per quel che riguarda le schermature oltre alle tipologie classiche a rullo e veneziane sono stati implementati i materiali cellulari a nido d'ape per l'integrazione in intercapedine di componenti trasparenti.

Il principale limite di WINDOW deriva dall'impossibilità di modellare intercapedini ventilate.

Il software **ParaSol** (ultima versione 6.6) sviluppato nel 2002 dall'Università di Lund in Svezia permette di valutare le prestazioni di componenti trasparenti con schermature. Lo strumento è adatto per una fase preliminare

Glass Library

ID #: 30010 Thickness: 7.0 mm

Name: Thermochromic1_24.LBL

Product Name: Thermochromic1_24

Manufacturer: LBNL

Type: Thermochromic

Conductivity: 1.000 W/m-K

	Light				Dark
Temp	24.000	34.000	48.000	62.000	75.000
Color:					
Solar					
Trans, Front (Tsol):	0.684	0.632	0.533	0.410	0.331
Trans, Back (Tsol2):	0.684	0.632	0.533	0.410	0.331
Reflect, Front (Rsol1):	0.081	0.064	0.058	0.053	0.050
Reflect, Back (Rsol2):	0.078	0.064	0.058	0.053	0.050
Visible					
Trans, Front (Tvis):	0.734	0.622	0.417	0.197	0.087
Trans, Back (Tvis2):	0.734	0.622	0.417	0.197	0.087
Reflect, Front (Rvis1):	0.085	0.064	0.052	0.045	0.043
Reflect, Back (Rvis2):	0.083	0.064	0.052	0.045	0.043
IR					
Trans (Tir):	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Emis., Front (Emis1):	0.840	0.840	0.840	0.840	0.840
Emis., Back (Emis2):	0.840	0.840	0.840	0.840	0.840

Figura 4.1: Esempio di dati di input per vetro termocromico, software WINDOW.

di progetto e permette di simulare la prestazione di pacchetti trasparenti con schermature posizionate sul lato interno, esterno o in intercapedine. Attraverso delle simulazioni dinamiche mensili lo strumento restituisce valori per ogni mese del coefficiente di trasmissione solare e totale del pacchetto in analisi (τ_s e g). Il programma dispone di un sistema per valutare l'illuminazione naturale e il comfort termico della soluzione simulata. Inoltre il modello permette di fare delle valutazioni preliminari dal punto di vista energetico sulla tecnologia analizzata a livello di edificio calcolando la domanda di energia, i carichi termici dell'ambiente simulato.

Rispetto ai modelli precedenti che permettono di calcolare le proprietà dei componenti **COMFEN** (versione 5) serve per calcolare le implicazioni di comfort e energetiche in edifici vetrati ad uso uffici. Il modello è stato sviluppato

Switching Parameter	System Properties								
Layer Temp	Tsol	Abs1	Abs2	Rtsol	Rbsol	Tvis	Rtvis	Rbvis	SHGC
22.000	0.263	0.661	0.025	0.066	0.112	0.320	0.071	0.128	0.392
34.000	0.239	0.672	0.025	0.065	0.111	0.285	0.066	0.126	0.372
49.000	0.190	0.727	0.022	0.062	0.110	0.160	0.058	0.123	0.331
64.000	0.135	0.784	0.019	0.062	0.109	0.062	0.055	0.121	0.286
77.000	0.105	0.822	0.016	0.057	0.109	0.022	0.053	0.121	0.261
30.000	0.248	0.661	0.025	0.065	0.112	0.287	0.068	0.126	0.380

Figura 4.2: Esempio di output vetro termotropico software WINDOW, parametri dinamici in funzione della temperatura del vetro.

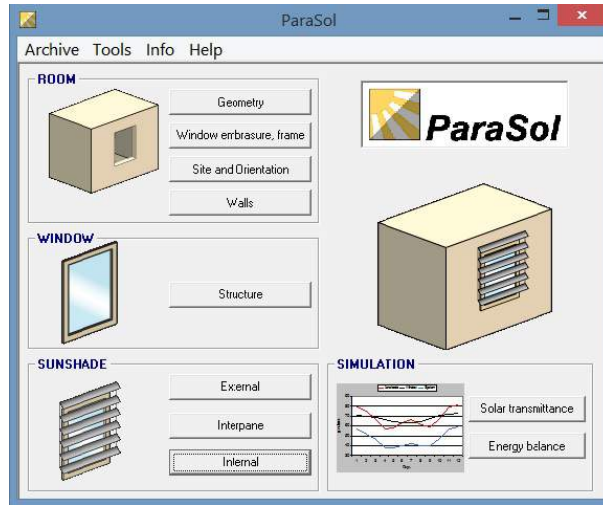


Figura 4.3: Interfaccia ParaSol

sempre dal gruppo del Lawrence Berkley Laboratory. Lo scopo principale del software è di confrontare diverse configurazioni architettoniche e valutare la soluzione tecnologica vantaggiosa dal punto di vista energetico, del comfort termico e luminoso ed economico. Il software dialoga con WINDOW e Energyplus. Grazie all'interoperabilità è quindi possibile importare sistemi trasparenti creati in ambiente WINDOW. Dal punto di vista impiantistico è possibile modellare l'impianto HVAC e nell'ultima versione è disponibile un modulo per la ventilazione naturale.



Figura 4.4: Schermata di COMFEN

Uno dei primi modelli per caratterizzare il comportamento dei materiali a cambiamento di fase integrati nei componenti trasparenti è di *Manz et al* [62] e risale al 1996. Il modello era stato studiato per essere validato con i dati sperimentali di un prototipo con PCM. Lo strumento di calcolo è mono dimensionale

e la trasmissione del calore viene simulata solo per conduzione. Particolare attenzione era posta nella modellazione delle proprietà ottiche e solari del PCM che durante la giornata possono cambiare notevolmente; quando il materiale è allo stato solido, diffonde la radiazione solare, mentre quando il PCM è liquido, trasmette direttamente la radiazione solare. Questa caratteristica rende particolarmente interessante l'applicazione di PCM nel vetro, ma complica la modellazione del componente, perché le proprietà di assorbimento della radiazione a bassa lunghezza d'onda cambiano notevolmente durante la giornata. Altri autori hanno sviluppato il tema [91], [55], mentre è di recente sviluppo un modello semplificato per simulare il PCM nel vetro di *Goia et al.* [47]. Il modello è stato sviluppato per analisi di componenti in fase preliminare al fine di determinarne la prestazione energetica. La struttura è monodimensionale e il vetro è caratterizzato da tre nodi, mentre il materiale a cambiamento di fase da 5. I nodi del PCM rappresentano la discretizzazione del materiale e ognuno può essere allo stato solido, liquido o semi-liquefatto. Lo strumento è costituito da due modelli, uno per la risoluzione dell'equazione di bilancio sui nodi e il secondo per la valutazione la quota di radiazione solare assorbita e trasmessa dal componente. Le equazioni di bilancio dei nodi considerano la capacità termica del vetro e del PCM. Il modello è stato validato e calibrato con i dati sperimentali raccolti durante il monitoraggio di un prototipo in test-cell. I risultati mostrano una buona concordanza tra i dati sperimentali e simulati per quel che riguarda le temperature superficiali, mentre i valori modellati di flusso termico e radiazione solare trasmessa si discostano dai dati misurati, a causa probabilmente, di alcune semplificazioni adottate nel modello.

4.2 Modelli per sistemi di facciata trasparenti

Il numero di modelli per simulare sistemi di facciata trasparente è elevato e sono numerose le classificazioni. Da una recente pubblicazione che analizza lo stato dell'arte sui modelli numerici per le facciate ventilate per sistemi trasparenti [39], sono elencati modelli a parametri concentrati e a soluzione analitica, modelli con soluzione non dimensionale, airflow network modelling, a volumi di controllo, ad approccio zonale, modelli basati su codici di fluidodinamica computazionale (CFD), modelli che integrano CFD e parametri concentrati. Particolare attenzione è stata data ai modelli di calcolo a parametri concentrati, zonali e i codici CFD accoppiati con equazioni per il calcolo termico.

4.2.1 Modelli semplificati

Intorno agli anni '90 vengono formulati i primi modelli per simulare la prestazione dei muri di Trombe [39]. Da questi si sviluppano diversi lavori che implementano le equazioni per il calcolo della prestazione di sistemi trasparenti con ventilazione dell'aria in intercapedine. **WIS** Window Information System è un software libero per il calcolo delle prestazioni termiche e solari di sistemi di facciata. Nasce da un progetto europeo tra il 2000-2004 ed è stato sviluppato dalla collaborazione di diversi partner europei. Le priorità e gli scopi di WIS sono diversi rispetto a quelli di WINDOW; infatti i metodi di calcolo applicati da WIS sono basati sulla normativa europea a differenza di quelli di WINDOW. Grazie ad un accordo di collaborazione tra EU e USA, esiste la possibilità di

effettuare calcoli con THERM partendo da un elemento trasparente modellato in WIS.

Le principali assunzioni del software WIS sono che:

- la facciata è modellata come un unico nodo resistivo, si assumono quindi condizioni di temperatura uniformi su tutta la superficie del vetro,
- le proprietà termiche e solari del sistema trasparente sono monodimensionali e perpendicolari alla superficie della finestra,
- la temperatura dell'aria in intercapedine è calcolata come un valore equivalente.

La caratteristica che interessa maggiormente per il lavoro di ricerca è che con WIS è possibile calcolare le prestazioni di facciate ventilate meccanicamente e naturalmente. L'intercapedine può essere modellata come chiusa (configurazione buffer), ventilata naturalmente o meccanicamente. Tra i principali output del software ci sono le temperature ai diversi nodi del sistema modellato, le caratteristiche termiche e solari del sistema, le proprietà termiche e solari di ogni componente, la temperatura di ogni strato. Il limite del software, oltre a non funzionare sui nuovi sistemi operativi di Windows, consiste nella modellazione dell'aria in intercapedine. La temperatura dell'aria non può essere modellata con una portata d'aria ad una temperatura diversa da quella dell'aria esterna o interna. Nel lavoro di ricerca si dimostrerà che questa assunzione non è corretta e può essere fonte di errore. Inoltre non sono stati implementati materiali trasparenti intelligenti. Il software WIS è stato utilizzato per calcolare la prestazione energetica di una facciata meccanica trasparente (CSb) e una facciata con schermatura esterna e vetro riflettente (R-CSb) denominate rispettivamente attiva e passiva. Le due facciate sono descritte nel capitolo 8 e presentano la stratigrafia riportata in tabella 8.5. Le due tecnologie di facciata attiva e passiva sono state oggetto di un monitoraggio continuo della durata di 3 anni. I dati simulati sono stati confrontati con i dati misurati in campo. Si sono scelte tre giornate tipo per effettuare il confronto;

- giornata estiva soleggiata
- giornata invernale soleggiata
- giornata invernale nuvolosa facciata attiva e passiva con schermatura aperta

Per le condizioni al contorno delle giornate simulate con WIS si sono usati i dati raccolti durante il monitoraggio. Tra gli input del modello si sono inseriti: la temperatura dell'aria esterna, interna, e la radiazione solare incidente sul piano verticale. Per i coefficienti di scambio termico liminare interno ed esterno si sono utilizzati i valori da normativa. Durante il monitoraggio si è misurata la portata nominale dell'aria di ventilazione nell'intercapedine (pari a $0,22 \text{ kg/s}$) e il valore si è utilizzato come input per il modello di WIS. Il software considera l'intercapedine divisa in due parti dalla schermatura e fornisce la possibilità di scegliere se l'aria immessa nell'intercapedine è alla temperatura dell'aria interna o di quella esterna. Il limite del software sulla modellazione dell'aria in intercapedine è stato risolto grazie ad alcune prove di simulazione da cui è risultato che

per il periodo estivo, i valori di portata più corretti da assumere sono definiti dalla seguente equazione:

$$t_{cav} = \frac{t_{out} \cdot \dot{m}_1 + t_{in} \cdot \dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (4.1)$$

dove t_{cav} è la temperatura media dell'aria in intercapedine, t_{out} è la temperatura dell'aria esterna, t_{in} è la temperatura dell'aria interna. A denominatore si trova il valore della portata nominale dell'aria di ventilazione in intercapedine. Grazie ai dati sperimentali è stato possibile calcolare il valore delle due portate \dot{m}_1 e \dot{m}_2 da inserire come input nel software di calcolo WIS a cui si è assegnata rispettivamente il valore della temperatura dell'aria esterna e dell'aria interna. La simulazione con WIS è stata lanciata per le ore 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00 18:00 e 20:00. Per ogni orario si sono calcolate le temperatura dei diversi nodi e la trasmittanza termica del sistemi di facciata. Applicando l'equazione 6.7 si è calcolato il flusso termico totale in W/m^2 che attraversa il componente:

$$\dot{q}_{tot} = U \cdot (t_{out} - t_{in}) + g \cdot I_{out} \quad (4.2)$$

dove la trasmittanza termica U in $W/(m^2K)$ e il coefficiente di trasmissione solare g in $[-]$ dei sistemi vetrati si sono ricavate dalle simulazioni con WIS per le diverse ore di calcolo. Per i valori di irradianza solare incidente I_{out} in W/m^2 , t_{out} e t_{in} si sono utilizzati i valori monitorati. Dall'integrazione sul tempo dei valori calcolati con 6.7 si sono ottenuti i valori di energie giornaliere in Wh/m^2 .

$$q_{tot} = \int_{08:00}^{20:00} \dot{q}_{tot}(\tau) d\tau \quad (4.3)$$

I risultati hanno mostrato che durante la giornata estiva soleggiata:

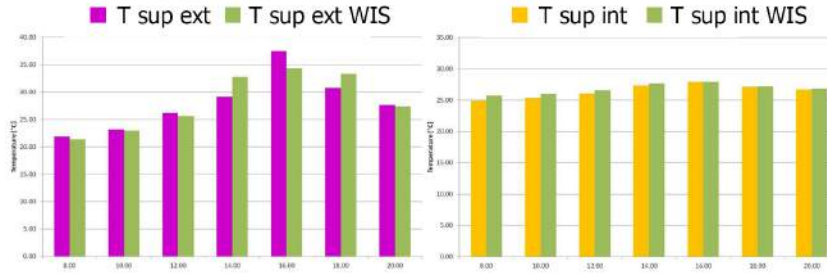


Figura 4.5: Facciata attiva, giornata estiva soleggiata. Confronto tra le temperature superficiali orarie simulate con WIS e misurate. A sinistra temperature superficiali esterne a destra temperature superficiali interne.

- le temperature superficiali esterne ed interne per la facciata attiva e passiva, calcolate con il software sono confrontabili con quelle monitorate durante una giornata estiva soleggiata (figura 4.6)
- i valori di trasmittanza termica calcolati con il software WIS sono confrontabili con quelli ricavati dalle elaborazioni dei dati sperimentali vedi capitolo 9.3.2.

- le energie calcolate con la trasmittanza termica e il fattore solare orario calcolato con WIS non sono confrontabili con quelle monitorate. WIS sottostima i carichi termici entranti nella stagione estiva in presenza di schermature solari (figura 4.7 a sinistra) e le energie calcolate con il modello sono inferiori del 40% rispetto a quelle monitorate.
- si è verificato che la differenza nel calcolo delle energie utilizzando il coefficiente di trasmissione globale che varia in funzione dell'angolo di incidenza oppure il coefficiente di trasmissione globale fisso per un angolo di incidenza di 90° non comporta un grave errore per la facciata attiva e passiva (figura 4.7 a destra).

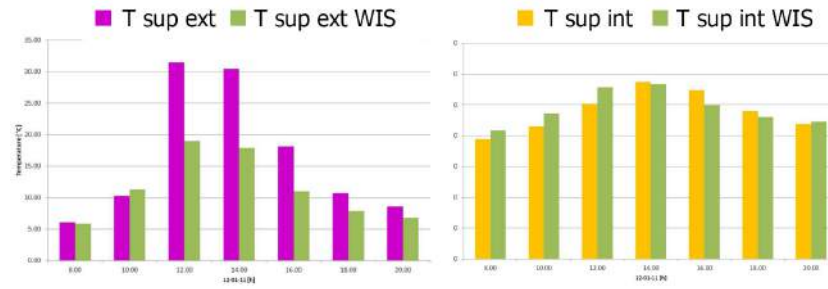


Figura 4.6: Facciata attiva, giornata invernale soleggiata. Confronto tra le temperature superficiali orarie simulate con WIS e misurate. A sinistra temperature superficiali esterne a destra temperature superficiali interne.

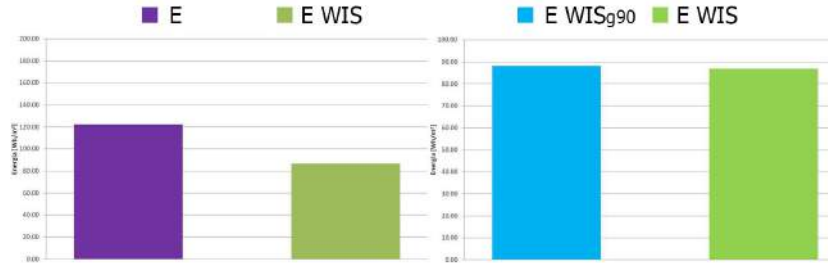


Figura 4.7: Facciata attiva, giornata invernale soleggiata. Confronto tra le energie totali simulate e misurate a sinistra. Confronto tra le energie simulate con valore di g a incidenza normale e variabile in funzione dell'angolo di incidenza del sole.

I risultati hanno mostrato che durante la giornata invernale soleggiata:

- per la facciata attiva i valori di temperatura superficiale interna calcolati dal software sono confrontabili con quelli monitorati mentre le temperature superficiali esterne sono sottostimate da WIS durante una giornata soleggiata invernale (figura ??).
- la trasmittanza calcolata con il software WIS è inferiore rispetto a quella calcolata dai dati monitorati

- per la facciata attiva e passiva le energie negative (corrispondono al carico per il riscaldamento) calcolate con WIS sono confrontabili con i dati monitorati mentre quelle positive (carico di raffrescamento) sono inferiori figura 4.8.

I risultati hanno mostrato che durante la giornata invernale nuvolosa:

- per la facciata attiva e passiva i valori di temperatura superficiale interna calcolati dal software sono confrontabili con quelli monitorati. I valori di temperature superficiali esterne per la facciata attiva sono sottostimate da WIS,
- la trasmittanza termica calcolata con il software WIS è inferiore rispetto a quella calcolata dai dati monitorati, mentre la trasmittanza termica della facciata passiva è superiore rispetto a quella calcolata dai dati di monitoraggio
- l'energia giornaliera che attraversa la facciata attiva calcolata con il software WIS è inferiore di circa il 19% rispetto ai valori calcolati dai dati monitorati.
- l'energia che attraversa la facciata passiva calcolata con il software WIS è superiore del 16% rispetto ai valori calcolati dai dati monitorati (come per la giornata soleggiata invernale).

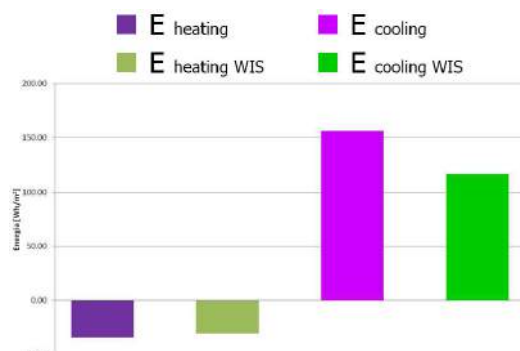


Figura 4.8: Facciata attiva, giornata invernale soleggiata. Energie simulate con WIS e misurate

E' possibile concludere che WIS per la progettazione di sistemi trasparenti deve essere utilizzato con le dovute attenzioni. Per il caso studio analizzato, in alcune situazioni si è calcolato un errore del 40 % rispetto ai dati misurati.

Park et al. (2004) [33] hanno validato un modello a **parametri concentrati** con dati sperimentali applicando la **tecnica del grey-box**. Gli autori modellano il comportamento fisico di una FTA in una dimensione. La scelta di evitare l'approccio 2D o 3D, deriva dal fatto che spesso l'utilizzo di un modello complesso non è garanzia di un risultato più corretto, nonostante il calcolo computazionale fluidodinamico dell'aria nell'intercapedine, infatti la complessa realtà degli scambi termici nell'intercapedine spesso non viene rappresentata in modo corretto dai modelli più avanzati. Nell'articolo sono presentate le equazioni di bilancio tradizionali e di conservazione dell'energia calcolate sui nodi del sistema di facciata. Il modello parte:

- calcolando la quota di radiazione solare diretta, diffusa e riflessa,
- valutando la radiazione ad alta lunghezza d'onda tra le lastre,
- calcolando i coefficienti di scambio convettivo (esterno, interno, delle superfici verso intercapedine),
- calcolando il flusso di calore asportato dall'aria in intercapedine.

Grazie alla calibrazione del modello con i dati sperimentali, gli autori sono stati in grado di ridurre l'errore derivante dall'utilizzo di un modello semplificato. I risultati della validazione hanno mostrato che alcuni parametri caratteristici della facciata a doppia pelle possono essere molto diversi rispetto ai valori standard da letteratura. L'ottima accuratezza del modello è dovuta principalmente alla calibrazione del modello con dati sperimentali.

4.2.2 Modelli avanzati

I modelli **zonali** sono caratterizzati da una struttura più dettagliata del sistema di facciata analizzato rispetto a quelli dei modelli semplificati. In letteratura sono presenti modelli che rientrano in questa tipologia con un diverso grado di complessità [95]. Questa tipologia di modelli divide la facciata in elementi più piccoli; in strisce orizzontali, ognuna delle quali è a sua volta divisa in segmenti più piccoli, i quali a loro volta sono divisi in layers. I layers sono discretizzati in elementi più piccoli che rappresentano i parametri concentrati di calcolo. Ogni nodo di calcolo è collegato con il nodo adiacente da una rete di equazioni. La ventilazione dell'aria in intercapedine si considera generalmente come verticale (non si considera la possibilità di moti convettivi o ricircoli) ed esiste la possibilità di simulare sistemi con ventilazione dell'intercapedine meccanica e naturale.

Zanghirella et al. [96, 95] hanno sviluppato un modello zonale a due dimensioni per valutare la prestazione energetica di sistemi FTA con un metodo di calcolo dettagliato che permettesse simulazioni rapide. Il modello è stato confrontato con il modello semplificato MATS (Modelling Active Transparent Systems) sviluppato durante il lavoro di tesi (vedi capitolo 10). Il codice è stato implementato nell'ambiente Simulink/Matlab e permette di simulare FTA con ventilazione nell'intercapedine meccanica. Gli output del modello sono: le temperature dei diversi nodi e i flussi termici che attraversano la facciata. E' possibile lanciare simulazioni con un profilo temporale delle condizioni al contorno.

La facciata analizzata viene divisa in zone orizzontali sovrapposte, che sono collegate tra loro solo dall'aria dell'intercapedine ventilata. Maggiore è il numero di zone in cui si divide la facciata, più accurati sono i risultati, ma i tempi e lo sforzo computazionale possono essere elevati.

Il modello si basa su un analogo elettrico. Ogni strato possiede una resistenza termica e capacità termica (equivalente del condensatore) e la radiazione solare assorbita dagli strati corrisponde alla corrente generata dal generatore. Inoltre ogni strato di vetro che compone il sistema di facciata è diviso in strisce verticali. Per ogni zona del modello sono scritte e risolte le equazioni di conservazione dell'energia che considerano:

- la quota di radiazione solare assorbita dal layer,

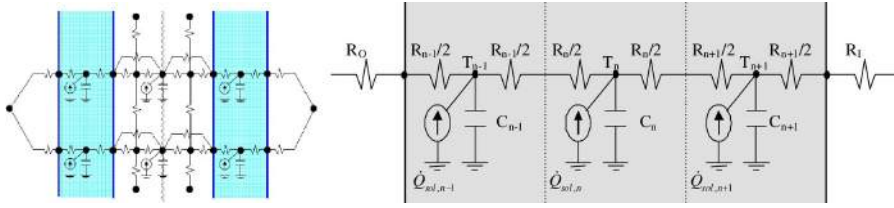


Figura 4.9: Schema dell'equivalente termico di una configurazione di FTA da fig. 3.2 tesi di dottorato *F. Zanghirella* [95] a sinistra. Discretizzazione e schema di calcolo dello scambio termico per conduzione tra i layers del vetro da fig. 6 [96].

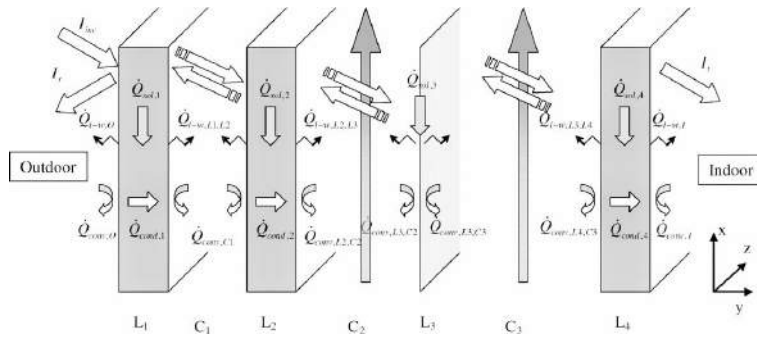


Figura 4.10: Schema degli scambi termici in ogni zona del sistema di facciata da fig. 2 in [96].

- la quota ad alta lunghezza d'onda radiativa e convettiva tra i layer,
- il flusso entalpico dell'aria di ventilazione nell'intercapedine,
- la quota conduttiva tra i diversi layers del sistema.

Le schermature nell'intercapedine sono assunti come nodi privi di resistenza termica, ma con una certa capacità termica e semitrasparenti. Nel modello non sono considerati gli effetti di bordo dovuti alla presenza del telaio. Dati sperimentali provenienti da due diverse campagne di misura sono stati utilizzati per calibrare e validare il modello. Il primo set di dati proviene da una sperimentazione su cella di prova mentre i secondi da un sistema di facciata applicato ad un edificio funzionante.

I risultati dettagliati sono presenti nei lavori di *Zanghirella* [95, 96]. In sintesi è possibile riassumere che per i dati sperimentali raccolti nella cella di prova, sia per la configurazione con veneziana che tenda a rullo che il modello simula:

- con una buona accuratezza la temperatura della superficie del vetro interno ed esterno e della schermatura,
- con qualche criticità la temperatura dell'aria nell'intercapedine verso l'esterno,
- valori di flusso termico inferiori di circa 10 e i 16 W/m^2 rispetto ai valori misurati nella cella sperimentale.

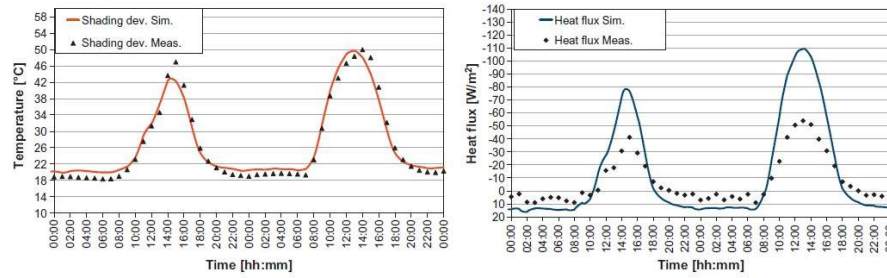


Figura 4.11: Validazione del modello con dati sperimentali, configurazione con schermatura a rullo. Temperatura della schermatura a sinistra, andamento dei flussi termici a destra da fig. 10 e 13 in [96].

Dall'analisi dei risultati la maggiore differenza rispetto ai dati sperimentali e quindi errore di simulazione si rileva nei flussi termici. Gli autori evidenziano che una delle possibili cause nella discrepanza tra flussi termici misurati e simulati può derivare dalla differenza tra i coefficienti di scambio termico liminare superficiali misurati e modellati.

Un altro set di simulazioni ha verificato che inserendo come input al modello il valore di coefficiente di scambio termico liminare misurato i risultati delle simulazioni si avvicinano maggiormente ai dati sperimentali. I risultati mostrano che l'accuratezza nel simulare le temperature si riduce, mentre i flussi termici calcolati sono maggiormente vicini a quelli misurati. Il valore del REQM passa da $19,2 \text{ W/m}^2$ a $8,4 \text{ W/m}^2$.

Il confronto tra il secondo set dei dati misurati, derivanti dal monitoraggio dell'edificio con facciata meccanica FTA, e quelli del modello mostrano valori confrontabili. In presenza di radiazione solare il modello calcola valori di flusso termico maggiori rispetto a quelli misurati. Il valore massimo REQM calcolato è di $14,5 \text{ W/m}^2$.

I modelli **CFD** basati su codici di fluidodinamica computazionale, sono stati utilizzati spesso per simulare sistemi di facciata trasparenti. *Hensen et al.* [54] affermano che sebbene questo metodo è applicabile per lo studio dei fenomeni fisici di tutte le tipologie di fluidi, nel caso dei sistemi di facciata trasparenti il calcolo è molto complesso a causa della potenza di calcolo richiesta, delle variabilità delle condizioni al contorno, dell'influenza degli occupanti. Per questo motivo le simulazioni con questa tecnica sono state spesso ristrette a periodi molto brevi di calcolo e a condizioni stazionarie. Inoltre dall'analisi di sensibilità di diversi modelli CFD è emerso l'importanza di validare i modelli con dati sperimentali, ma i parametri calcolati dai modelli CFD, mappe di velocità dell'aria, pressione e temperatura, difficilmente possono essere misurati in campo. Inoltre l'accuratezza di questa tipologia di modelli e funzione della geometria del problema analizzato e della griglia del calcolo computazionale [96]. Nonostante queste criticità il metodo CFD ha mostrato buoni risultati nella capacità di simulare facciate trasparenti e risulta molto adatto per valutazioni di soluzioni di facciata definitive. Dall'analisi bibliografica emerge dunque che la tendenza dei nuovi modelli avanzati sembra essere quella dei modelli che accoppiano la simulazione CFD al calcolo dell'energia dell'edificio. In questo modo i tempi di simulazione si riducono e l'accuratezza del calcolo è conservata. Gli autori

Manz e Frank in [63] hanno creato un modello per la simulazione di facciate vetrate che accoppia la CFD, ad un modello ottico spettrale e ad un modello di simulazione energetica per edifici.

Tra i software commerciali TAS (EDSL) permette di effettuare simulazioni energetiche di facciate attive e di geometrie di edifici complessi con un codice 2D di CFD.

Capitolo 5

Il monitoraggio in campo

Nel capitolo è presentata la metodologia di misura sperimentale applicata per le misure in campo di sistemi di involucro trasparenti applicati a *test cell*. Vengono presentati le metodologie e gli strumenti di misura per la prestazione termica, acustica e luminosa in campo.

5.1 La metodologia di misura sperimentale

L'architettura di un sistema di monitoraggio è generalmente costituito da tre fasi [75]:

- l'acquisizione dei dati
- l'elaborazione dei dati
- la diffusione dei dati

Il capitolo 5 e i successivi 6 e 9 si articolano secondo queste tre fasi. Nel presente capitolo sono definiti i sensori di misura e le metodologie, per caratterizzare il sistema o il componente dal punto di vista termico, acustico, luminoso.

Secondo gli autori di “*Measurement Science for Engineers*” [75] ogni misura è un esperimento. Per questo motivo c'è sempre una differenza tra il modello teorico che descrive il comportamento dell'elemento e la sua misura. Le cause sono principalmente due: il modello è inadeguato, e/o sono presenti errori di misura. Il risultato di ogni misurazione di una grandezza fisica, qualsiasi sia lo strumento utilizzato, non è mai un valore numerico X univocamente definito, ma dovrebbe essere espresso come un intervallo di valori. Per praticità di elaborazione dei dati si preferisce assumere il valore misurato come valido e gestire la variabilità del dato con coefficienti di sicurezza e intervalli di affidabilità della misura.

Le misure descritte nel paragrafo si riferiscono alla caratterizzazione del comportamento fisico tecnico di un componente o di un sistema di facciata trasparente. Non è stato trattato il tema dei consumi o del fabbisogno totale dell'edificio perché lo scopo delle misure era caratterizzare l'elemento testato e le tecnologie analizzate sono principalmente applicate a celle di prova. Le tecniche di misura adottate possono essere applicate a componenti edilizi per la diagnosi energetica di edifici.

La terminologia tecnica e le definizioni specifiche sono tratte dal VIM Vocabolario Internazionale di Metrologia e dalla norma UNI 4546 del 1984.

5.1.1 Misure di prestazione termica in campo

Nelle misure termiche si dispongono in campo sensori per misurare le condizioni al contorno (temperatura dell'aria, velocità del vento e radiazione solare) e sensori per caratterizzare la prestazione del sistema analizzato. I principali strumenti utilizzati nelle campagne sperimentali su edifici o celle di prova sono:

- la termocoppia per la misura delle temperatura dell'aria e superficiali,
- il termoflussimetro per la misura del flusso termico superficiale,
- il piranometro per la misura della radiazione solare,
- l'anemometro a filo caldo per la misura della velocità dell'aria.

Le termocoppie sono costituite da due metalli diversi a contatto. Il loro principio di funzionamento è l'effetto Seebeck (1821), per il quale due metalli diversi a contatto generano una tensione elettrica proporzionale alla temperatura. La termocoppia è formata da due materiali metallici conduttori saldati ad una delle due estremità. L'estremità saldata è il sensore definito *giunto caldo* mentre l'altra estremità è il *giunto freddo*. Collegando la termocoppia ad un acquisitore è possibile determinare la differenza di temperatura tra i due giunti grazie al voltaggio prodotto a livello della giunzione di riferimento. Infatti la differenza di potenziale è funzione della temperatura del giunto di misura e del giunto di riferimento. La misura di temperatura con una termocoppia avviene dunque

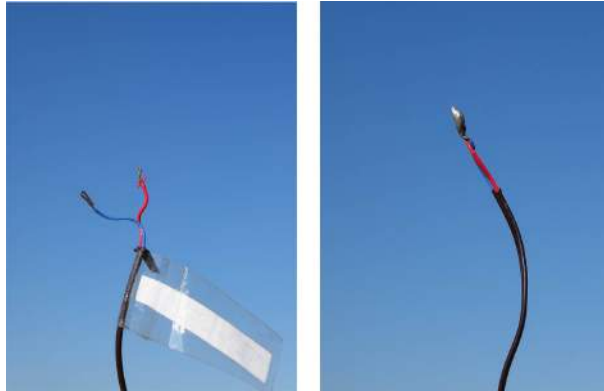


Figura 5.1: Termocoppia a sinistra giunto freddo (per la connessione all'acquisitore) a destra giunto caldo.

misurando il voltaggio generato tra i due giunti e la temperatura di uno dei due capi del filo (quello collegato all'acquisitore), è possibile determinare la temperatura dell'altro capo. Esistono diverse tipologie di termocoppie a seconda della coppia di metalli utilizzata.

Le più utilizzate per le misure in campo edilizio sono del tipo:

- T (T-type) costituite da rame e constantana. Range di misura -200°C $+350^{\circ}\text{C}$
- J (J-type) costituite da ferro e constantana. Fino a temperature di -40°C $+750^{\circ}\text{C}$

La constantana è una lega di nichel e rame. Questa tipologia di termocoppie ha un'accuratezza di misura tra $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ o lo 0,4% (dato fornito dal produttore). Tra i principali vantaggi nell'utilizzo di questi sensori si può enunciare la rapidità di risposta; grazie alle dimensioni piccole e alla bassa capacità termica, le termocoppie sono in grado di rispondere in pochi decimi di secondo alle variazioni di temperatura. Inoltre non necessitano di un'alimentazione e quindi non sono soggette a riscaldamento autonomo. Possono insorgere errori di misura quando i due metalli del giunto freddo non si trovano alla stessa temperatura. Per questo motivo è importante verificare ed eventualmente schermare la zona in cui si posiziona l'acquisitore con i sensori collegati. Un'altra fonte di errore è dovuta all'elevata lunghezza del cavo della termocoppia tra il giunto caldo e freddo. L'accuratezza¹ delle misure può essere influenzata dall'influenza dei campi elettrici e magnetici causando cambiamenti del segnale del livello del microvolt. L'interferenza del campo magnetico può essere limitata torcendo la coppia di fili della termocoppia mentre l'influenza del campo elettrico utilizzando un cavo schermato o facendo correre i fili nel tubo metallico.

Le termocoppie utilizzate nelle campagne sperimentale oggetto del lavoro di tesi sono di tipo T e J (dati da tabella 5.1). I sensori del tipo T sono dunque in grado di misurare valori di temperatura che variano tra i -200°C e 400°C , con una sensibilità² di $40\ \mu\text{V}/\text{K}$ mentre quelli J da -210°C e 760°C con una sensibilità di $45\ \mu\text{V}/\text{K}$ [75].

La tensione elettrica generata dalle termocoppie può dunque essere letta e registrata da un sistema di acquisizione (tipo data-taker). Le termocoppie sono collegate al sistema di acquisizione secondo due metodi:

- una termocoppia per canale,
- tre termocoppie per canale di acquisizione.

Se una termocoppia non è correttamente collegata al sistema di acquisizione può restituire valori fuori range di misura pari a 99999,9. Nel caso in cui la termocoppia sia rovinata o abbia un filo scoperto restituisce valori non corretti di temperatura, ma all'interno dei range di misura.

I termoflussimetri sono strumenti che misurano il flusso termico per unità di superficie. Collegando i cavi del termoflussimetro ad un acquisitore è possibile acquisire il segnale letto dal sensore in tensione elettrica in mV . La conversione tra tensione e flusso termico è funzione della sensibilità dello strumento, il cui valore è riportato sia sulla scheda tecnica (fornita dal produttore insieme allo

¹grado di concordanza tra il risultato di una misurazione ed il valore vero del misurando [65], concetto qualitativo. L'accuratezza di uno strumento dipende dalla risoluzione di lettura, dall'influenza degli errori sistematici e casuali, dalla stabilità a lungo periodo. E' un dato fornito dal produttore dello strumento.

²la sensibilità di uno strumento è definita nel Vocabolario Internazionale di Metrologia (VIM) come la variazione della risposta di uno strumento di misura divisa per la corrispondente variazione del segnale d'ingresso [65].

strumento) sia sul termoflussimetro stesso. La sensibilità è generalmente riportata in $\mu V/(W/m^2)$. L'acquisitore opportunamente programmato restituisce il valore del flusso per unità di superficie in $[W/m^2]$.

$$\dot{q} = x \cdot \frac{1000}{k} \quad (5.1)$$

dove:

\dot{q} è il flusso termico superficiale in $[W/m^2]$,

x è il valore di tensione misurato in mV ,

k è la sensibilità del termoflussimetro in $\mu V/(W/m^2)$.

I termoflussimetri utilizzati in campo sono costituiti da:

- piastra sensibile, posizionata nella zona centrale del sensore
- anello di guardia che protegge il sensore
- cavo che collega la piastra all'acquisitore

Il principio di funzionamento dello strumento sfrutta la legge della conduzione termica. Il sensore misura la differenza di temperatura attraverso il composto plastico-ceramico del quale è composto lo strumento, nota la differenza di temperatura e la resistenza termica del sensore, il flusso termico che attraversa il termoflussimetro è dato da:

$$\dot{q} = \frac{\Delta t}{R} \quad (5.2)$$

dove:

\dot{q} è il flusso termico superficiale in $[W/m^2]$,

Δt è la differenza di temperatura tra le facce del sensore $[^{\circ}C]$,

R è resistenza termica del sensore $[(m^2K)/W]$.

L'applicazione di un termoflussimetro su di una parete perturba il campo di misura nonostante la resistenza termica del termoflussimetro sia estremamente piccola. Tendenzialmente è possibile affermare che per le misure di flusso termico su una parete opaca la resistenza termica del termoflussimetro è trascurabile mentre nel caso di misura di flussi termici attraverso elementi trasparenti particolari accorgimenti devono essere presi (riportati nel paragrafo posa in opera dei sensori). Sulla scheda tecnica dei termoflussimetri usati durante la sperimentazione (Hukseflux HFPO1) è riportato il valore di resistenza termica del sensore: minore di $6,25 \cdot 10^{-3} (m^2K)/W$. Il range di misura è tra -2000 e +2000 W/m^2 . L'accuratezza del sensore se applicato a pareti è tra +5% e -5%.

Dal valore di accuratezza deriva la norma di considerare attendibili valori di flusso termico maggiori di $\pm 5W/m^2$ rilevati con differenze di temperature maggiori di $10^{\circ}C (\Delta t > 10)$.

I termoflussimetri sono collegati al sistema di acquisizione per mezzo delle estremità del cavo. L'apparecchiatura usata durante le misure in campo (data taker serie DT 600 e DT 85) permetteva di collegare un termoflussimetro per canale. In funzione della posizione dei fili sul morsetto positivo (+) o negativo (-) il segno del flusso termico letto dall'acquisitore cambia. La convenzione utilizzata nell'analisi dei dati sperimentali è stata che un flusso termico positivo indica un flusso termico entrante in ambiente, mentre un flusso con valore negativo che il flusso è uscente dall'ambiente.

I **solarimetri** permettono di misurare la radiazione solare globale vista dal campo visivo dello strumento (comprensiva della quota diretta e diffusa). Esistono principalmente due tipologie di sensori: solarimetri a termopila e solarimetri ad effetto fotovoltaico. Durante le misure in campo si sono utilizzati i solarimetri a termopila. La superficie sensibile del sensore è coperta con vernice nera opaca e costituita da una serie di termocoppie (che costituiscono la termopila). L'energia assorbita dalla superficie annerita della termopila crea una differenza di temperatura tra il centro della termopila (giunto caldo) ed il corpo del piranometro (giunto freddo). La differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo è convertita in una differenza di potenziale grazie all'effetto Seebeck. La differenza di potenziale che si genera nella termopila viene correlata al valore della radiazione solare globale incidente. Lo strumento è sensibile a un largo spettro della radiazione solare. Nel caso dei sensori utilizzati in campo (Hukseflux LP02) lo spettro rilevato è compreso tra le lunghezze d'onda di 285 e 3000 nm (dall'ultravioletto al vicino infrarosso). La sensibilità nominale dello strumento è pari a $15 \cdot 10^{-6} V/(W/m^2)$ e il range delle temperature in cui il sensore può operare è tra $-40^\circ C$ e $+80^\circ C$.

Gli anemometri a filo caldo sono stati utilizzati durante le misure in campo fondamentalmente per caratterizzare le intercapedini ventilate. La misura aveva come scopo principale di definire se la ventilazione in intercapedine era attiva. Grazie a questo strumento, misurando puntualmente la velocità dell'aria è stato possibile definire se l'aria in intercapedine fluiva. Il principio di funzionamento dell'anemometro a filo caldo si basa sul concetto che un corpo investito da un fluido più freddo cede calore in funzione della velocità del fluido stesso. Un filo metallico di pochi micrometri viene surriscaldato e mantenuto a temperatura costante, l'aria che fluisce raffredda il filo e conseguentemente la resistenza del filo varia. Lo strumento misura la differenza in millivolt in uscita dal filo e la converte nella velocità del flusso d'aria.

Preparazione dei sensori in laboratorio

Il primo passo per la pianificazione di un monitoraggio è la definizione del numero e della posizione dei sensori da mettere in campo, in funzione dello scopo del monitoraggio. E' opportuno determinare:

- la posizione dei sensori attraverso uno schema dell'ambiente,
- la codifica dei diversi sensori,
- la scrittura del programma di acquisizione.

Per i dettagli relativi alla posa in opera dei sensori si rimanda al paragrafo *posa in opera dei sensori*. Per il secondo punto si è evidenziato dalle esperienze maturate durante campagne sperimentali, l'importanza di codificare i sensori con un codice univoco che definisca la posizione del sensore e il canale su cui l'acquisitore registra quel segnale. Durante la raccolta dei dati sperimentali presentati nel lavoro si sono indicati con le seguenti lettere le grandezze :

- t temperatura,
- F o HF flusso termico (Heat Flux),

- I o S irradianza solare,
- v velocità dell'aria.

La scrittura del programma è una delle fasi più importanti del monitoraggio. Il programma trasmette al sistema di acquisizione la posizione dei sensori sui diversi canali e l'unità di misura in cui verrà letto il segnale. E' dunque possibile definire la tipologia del segnale acquisito con:

- V segnale in tensione,
- A segnale in intensità di corrente,
- F segnale in frequenza,
- T termocoppia, seguita dalla lettera che identifica il tipo di termocoppia (per esempio: TT, TJ).

Nel programma sarà inoltre necessario inserire la schedule con cui il sistema acquisirà e registrerà i dati. I dati che verranno presentati nei capitoli successivi sono stati raccolti con un time step di 15 minuti. Per l'elaborazione dei dati tendenzialmente si passa a valori orari, calcolati come la media dei valori letti ogni quarto d'ora.

È possibile assegnare il valore misurato ad un canale virtuale, ossia ad un canale che non esiste fisicamente sul datataker ma nel quale è possibile memorizzare dei valori. Un canale virtuale è definito dalla sigla CV preceduta dal numero del canale scelto arbitrariamente (per esempio 1CV, 2CV). L'assegnazione del valore misurato al canale virtuale avviene facendo precedere il simbolo di uguale all'indicazione del canale virtuale (per esempio =1CV). Di particolare interesse sono i canali virtuali per la misura di alcune grandezze come la radiazione solare che può assumere valori molto diversi a distanza di pochi minuti e quindi acquisendo il singolo valore ogni 15 minuti si perderebbe la dinamica del fenomeno. E' possibile dunque utilizzare i canali virtuali per acquisire valori con un intervallo di campionatura inferiore all'intervallo di salvataggio degli altri dati, e chiedere all'acquisitore di effettuare e salvare il valore medio dei valori acquisiti.

Utilizzando i canali virtuali si limita il rischio di occupare l'intera memoria dello strumento. Solitamente si includono nel programma di acquisizione anche i valori di taratura e sensibilità dei diversi strumenti in modo che il dato letto sull'acquisitore non debba più essere tarato. In alternativa è possibile applicare la taratura durante l'elaborazione dei dati. Infine gli ultimi modelli di acquisitori presentano la possibilità di accesso remoto, funzione particolarmente utile per verificare la corretta acquisizione di dati di sistemi non vicini.

La taratura delle termocoppie Con il termine taratura si intende il procedimento che determina come i segnali di uscita degli strumenti sono legati alle misure dei misurandi ed i valori nominali dei campioni materiali alle misure delle grandezze da essi riprodotte (da UNI 4546:1984).

Le termocoppie devono essere tarate per correggere l'errore di misura termocoppia - acquisitore. Il metodo di taratura seguito al dip. Energia del Politecnico di Torino è descritto nel manuale della Qualità del Laboratorio di Taratura [59]

e segue le indicazioni della norma UNI 4546 del 1984. Il metodo prevede di collegare le termocoppie da testare al canale previsto sul sistema di acquisizione. I sensori sono posizionati in un bagno termostatico riempito d'acqua dove la temperatura viene fissata e mantenuta costante. Particolare attenzione deve essere posta nell'inserire e mantenere i sensori nell'acqua in modo che non tocchino la superficie del bagno, ma siano a contatto solo con l'acqua. La procedura per i sensori utilizzati nelle misure in campo ha previsto di fissare la temperatura dell'acqua a tre diversi set point: 0°C, 20°C e 40°C.

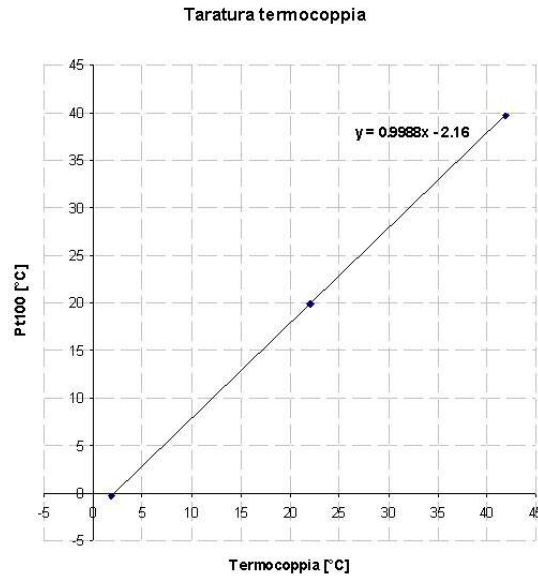


Figura 5.2: Curva di taratura di una termocoppia.

La temperatura misurata dalle termocoppie testate viene acquisita e confrontata con quella rilevata da una termoresistenza al platino PT100, la quale viene periodicamente tarata da un centro specializzato e autorizzato dal Servizio di Taratura in Italia (SIT). Dopo aver posizionato i sensori nel bagno viene inserita la termoresistenza PT100, si attende che i sensori si stabilizzino e si acquisisce per circa un quarto d'ora le letture delle termocoppie e della termoresistenza. La termoresistenza è collegata ad un sistema di acquisizione che restituisce i valori di resistenza in ohm (Ω) che possono essere tradotti in gradi centigradi grazie ad un apposita tabella di conversione dello strumento. L'operazione viene ripetuta per le tre diverse temperature di set point del bagno termostatico. Alla fine dell'operazione per ogni termocoppia si dispone di una retta di taratura passante per i tre punti di misura.

La curva di taratura si ottiene dalla regressione lineare dei valori misurati dalla termocoppia rispetto al valore misurato dalla PT100. Per ogni termocoppia testata si ottiene così il coefficiente angolare ed il termine noto della retta di regressione che fa corrispondere il valore misurato dalla termocoppia al valore misurato dalla più precisa PT100 (5.3).

$$t_{PT100} = m \cdot t_{TC} + q \quad (5.3)$$

dove:

t_{PT100} è la temperatura rilevata dalla termoresistenza di precisione (PT 100) [°C],

m è il coefficiente angolare della retta di regressione lineare [-],

t_{TC} è la temperatura rilevata dalla termocoppia [°C].

q è l'intercetta della retta (pari a zero se la retta passa per l'origine)

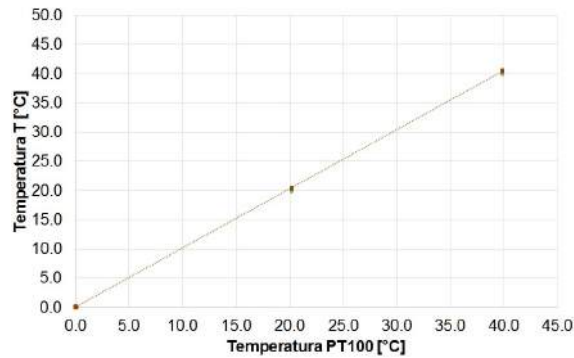


Figura 5.3: Curva di taratura di 36 termocoppie.

Più il termine m è vicino all'unità e più il termine q è vicino allo zero, minore sarà la differenza tra il campione e il sensore in analisi.

Nella figura 5.4 sono rappresentate le curve di tarature di 36 termocoppie collegate ad un acquisitore della serie DT85. La schedule di acquisizione è di 10 secondi. Per ogni set point, si è atteso che i sensori si stabilizzassero e poi la misura è durata 9 minuti, per un totale di 54 letture a set point. E' possibile notare che la differenza tra i valori rilevati (ai tre set point di misura) dalle termocoppie in fase di taratura rispetto a quelli rilevati dal campione è minima. Infatti il valore minimo di m rilevato è pari a 0,98, mentre per q il valore massimo è pari a 0,42. Coefficienti di taratura confrontabili sono stati rilevati durante la taratura di altri set di termocoppie con DT 85 mentre utilizzando acquisitori della serie DT 600 si sono rilevati differenze tra il campione e il sensore testato maggiori. E' possibile concludere che i sistemi di acquisizione di ultima generazione permettono di ridurre al minimo l'errore di misura termocoppia - acquisitore.

Verifica dei termoflussimetri I termoflussimetri presentano da scheda tecnica un valore di sensibilità definito dalla società che li produce. Prima della posa in opera del sistema di monitoraggio si sono verificate le caratteristiche dei diversi termoflussimetri in laboratorio. Il dipartimento Energia del Politecnico di Torino dispone di **una piastra calda con anello di guardia** (LASER-COMP FOX 600). Si sono posizionati i sensori nella piastra calda e si sono collegati al sistema di acquisizione, e si è lanciato il test dello strumento. I valori rilevati dai termoflussimetri sono stati confrontati con quelli rilevati dallo strumento. Non si sono registrate differenze rilevanti tra le due misure e tra i valori rilevati dai diversi strumenti.

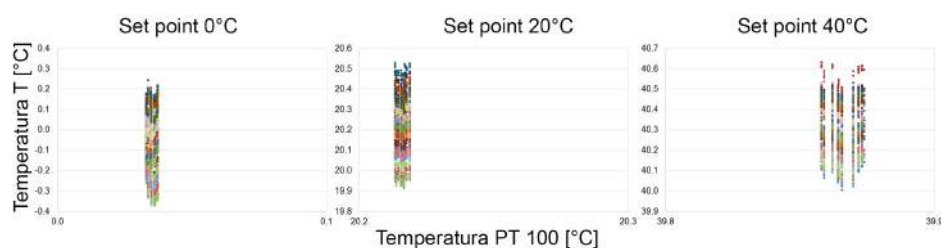


Figura 5.4: Correlazione tra i valori di temperatura misurati dalle termocoppie (asse delle y) e quelli della termoresistenza di precisione (asse delle x) per i tre diversi set point.

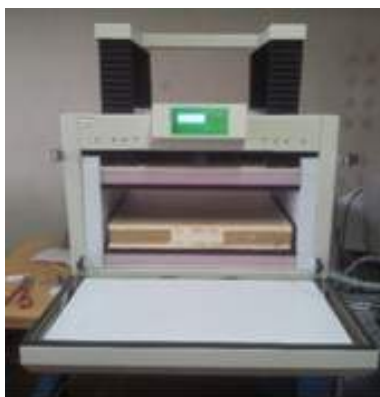


Figura 5.5: Piastra calda con anello di guardia.

La taratura dei solarimetri Una procedura analoga è stata condotta per i solarimetri. Cinque diversi solarimetri sono stati posizionati sulla copertura del dip. Energia del Politecnico di Torino, con il medesimo orientamento e in una posizione priva di ombreggiamento. I sensori sono stati collegati al sistema di acquisizione ed è stato scritto un programma con una schedule di acquisizione ogni 30 secondi. I valori di sensibilità dei cinque sensori sono stati inseriti nel programma. I dati raccolti sono riportati in figura ?? e mostrano che i valori misurati dai 5 strumenti sono confrontabili.

La posa in opera dei sensori

Durante la posa in opera dei sensori si deve prestare attenzione a:

- identificare un'area omogenea della superficie da testare dove posizionare i sensori,
- limitare l'influenza della radiazione solare incidente sul sensore di temperatura e flusso termico.

Per il primo punto prima della posa in opera dei sensori è buona norma verificare tramite un'indagine termografica la presenza di eventuali ponti termici, discontinuità o disomogeneità della struttura oggetto del monitoraggio. In questo modo è possibile evitare di posizionare il sensore in un punto critico della

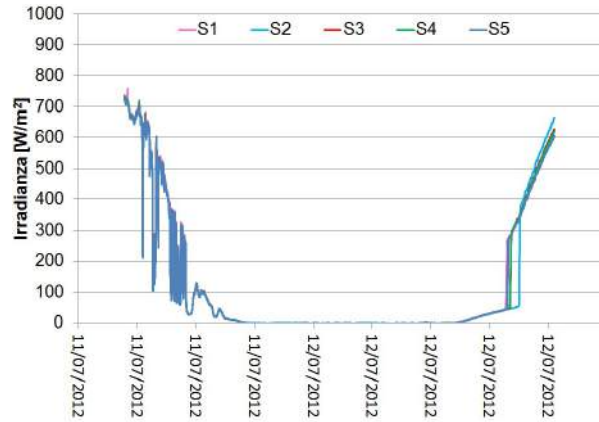


Figura 5.6: Verifica dei solarimetri.

struttura misurando un comportamento poco rappresentativo del sistema. Nel caso di componenti o sistemi trasparenti l'attenzione si concentra sul ponte termico tra vetro e telaio. I sensori devono essere posizionati in una zona in cui non si risente più dell'influsso del ponte termico. Tramite un'indagine termografica è possibile definire l'area dove le temperature superficiali dell'elemento investigato sono uniformi.

La radiazione solare incidente sui sensori di misura di temperatura e flusso termico è causa di un'alterazione del campo misurato. Nelle misure di prestazione termica sui componenti vetrati le accortezze devono essere maggiori a causa della difficoltà di schermare i sensori dalla radiazione solare diretta e da quella trasmessa. Sia i valori letti dai termoflussimetri che dalle termocoppie possono essere falsati a causa della radiazione solare incidente sul sensore che ne determina un surriscaldamento. Se la parte sensibile della termocoppia è esposta direttamente alla radiazione solare il sensore si surriscalda misurando valori non rappresentativi.

Allo stesso tempo durante il periodo invernale si può incorrere in un errore di misura dovuto al fatto che l'elevata conducibilità termica del sensore può portare il sensore ad avere una temperatura più fredda rispetto alla superficie o all'aria di misura. Per limitare l'influenza di questo errore di misura si può operare in due modi:

- applicando un valore correttivo funzione della radiazione solare,
- schermando il sensore.

La prima tecnica è stata applicata da *Saelens* nel suo lavoro [81] e ha determinato che l'errore dovuto alla radiazione solare per misure su facciate trasparenti è funzione, della quantità e della direzione del flusso solare, del tipo di sistema utilizzato per posizionare il sensore e dalla tipologia del vetro.

Zanghirella [95] nel suo lavoro di tesi di dottorato investiga sperimentalmente quale sia la migliore soluzione per schermare le termocoppie. Sulla base dei suoi risultati si è scelta la seconda tecnica per limitare l'influenza della radiazione solare durante le campagne sperimentali oggetto di questo lavoro.

Diversi accorgimenti per la schermatura del sensore sono stati applicati.



Figura 5.7: Schermatura di termocoppie.

Se il sensore è posizionato sulla superficie esterna o interna di un vetro, si è fissato il sensore alla superficie e si è schermato posizionando dei semi cilindri in plastica con nastro alluminato (vedi figura sinistra 5.7). Nel caso di sensori di temperatura nell'intercapedine, si sono schermati per mezzo di cilindri metallici con micro-ventilazione in aspirazione, tipo ventilatori RS (vedi figura destra 5.7).

La stessa tecnica viene applicata per i termoflussimetri esposti alla radiazione solare, in particolare se applicati su superfici trasparenti.

La criticità di questa soluzione deriva dal fatto che schermando i sensori si perturba il campo di misura, modificando localmente le condizioni al contorno dell'elemento testato. Da alcune analisi dell'errore, è emerso che se la schermatura è di dimensioni ridotte l'errore indotto è trascurabile [66].

Durante le misure condotte si è riscontrato una criticità nell'applicazione di questa tecnica a componenti trasparenti con materiale a cambiamento di fase. Infatti il posizionamento di nastro alluminato per schermare il sensore perturbava il campo termico schermando il materiale a cambiamento di fase e ritardando la fusione del materiale come è possibile vedere nella parte bassa dei componenti testati della foto 5.8.

5.1.2 Misure di prestazione acustica in campo

Per determinare il potere fonoisolante di un elemento di facciata per via sperimentale in campo è possibile applicare due tecniche di misura diverse:

- metodo secondo la norma UNI EN ISO 140-5 del 2000,
- metodo intensimetrico secondo la UNI EN ISO 15186-2 del 2010.

Il primo metodo prevede il calcolo dell'isolamento acustico al rumore aereo delle pareti in opera secondo la formula dell'isolamento acustico (equazione 3.14). La misura viene condotta posizionando una sorgente in un ambiente definito emittente che genera un suono, la posizione della sorgente deve essere tale per cui il suono generato arrivi sull'elemento testato in modo diffuso. La potenza sonora della sorgente deve essere sufficientemente alta in modo da garantire un livello nell'ambiente ricevente maggiore di 10 dB per tutte le frequenze. Si rileva il livello di pressione sonora per bande di 1/3 di ottava nella camera ricevente ed emittente [15].

Nell'ambiente ricevente viene calcolato il tempo di riverberazione al fine di correggere i valori misurati in funzione dell'area di assorbimento acustico

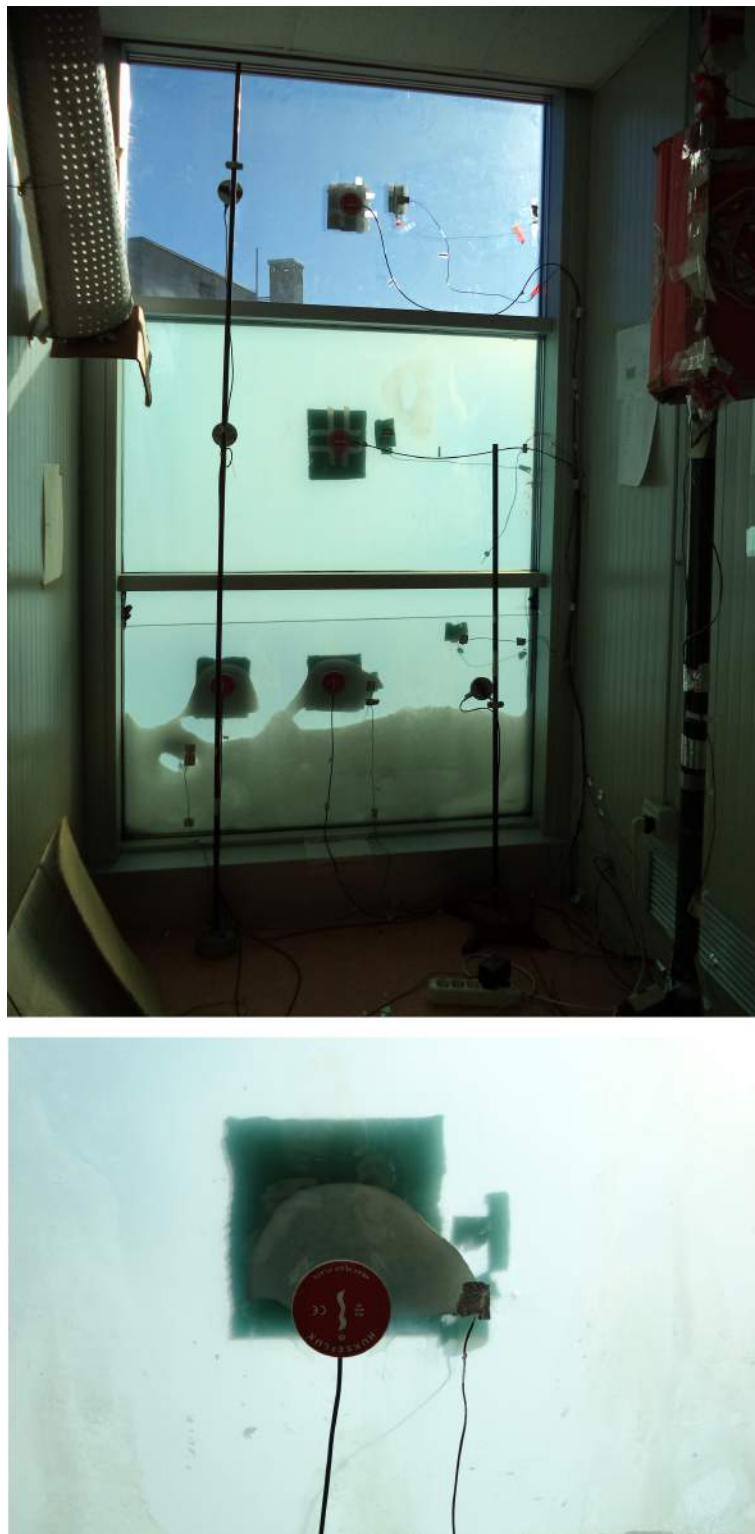


Figura 5.8: Test cell sulla copertura del dip. Energia del Politecnico di Torino. Schermatura dei sensori di temperatura e flusso termico con nastro alluminato. Il materiale a cambiamento di fase dietro al termoflussimetro non si è sciolto a causa della schermatura con nastro alluminato.



Figura 5.9: Test cell sulla copertura del dip. Energia del Politecnico di Torino. Schermatura dei sensori di temperatura e flusso termico con nastro alluminato.

equivalente definita secondo la formula di Sabine:

$$A = \frac{0,161 \cdot V}{T} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.4)$$

Il tempo di riverberazione T è misurato seguendo le indicazioni della UNI EN ISO 354.

Il primo metodo (UNI EN ISO 140-5) prevede il calcolo di due tipi di indici di isolamento acustico:

- l'isolamento acustico normalizzato rispetto all'area di assorbimento equivalente

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{A_0} \text{ [dB]} \quad (5.5)$$

dove A è l'area di assorbimento acustico equivalente [m^2] e A_0 è l'area di assorbimento acustico equivalente [m^2] di riferimento pari a 10 [m^2].

- l'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione

$$D_{nT} = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ [dB]} \quad (5.6)$$

dove T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento uguale a 0,5 secondi.

Nelle misure in laboratorio grazie al disaccoppiamento elastico delle camere le trasmissioni laterali sono minime, mentre nelle misure in campo non si ha il controllo delle trasmissioni laterali. Per questo motivo la misura in opera porta alla definizione del *potere fonoisolante apparente* R' . L'indice R' è comprensivo

delle trasmissioni laterali oltre la componente trasmessa per via aerea attraverso la parete testata. Nella norma vengono inoltre indicate le posizioni delle sorgenti sonore per effettuare la misura. Particolare attenzione deve essere posta al rumore di fondo in particolare se la misura viene effettuata in cantiere o in ambienti già abitati. La norma prescrive che il livello del rumore di fondo deve essere inferiore per ogni banda di frequenza di almeno 6 dB rispetto al livello del segnale.

Il secondo metodo con sonda intensimetrica permette di determinare il potere fonoisolante dell'elemento testato misurando il livello di intensità sonora trasmesso dalla parete. A differenza del primo metodo la sonda intensimetrica è in grado di misurare valori di intensità sonora trasmessi dall'elemento studiato in modo puntuale e quindi la misura non è influenzata dalla presenza di trasmissioni laterali. L'*intensità acustica (o sonora)* viene definita in ogni punto del campo sonoro come il prodotto tra pressione sonora istantanea e vettore velocità istantanea delle particelle [15] in W/m^2 . L'intensità sonora è una grandezza vettoriale che fornisce un'indicazione dell'ampiezza e della direzione del flusso istantaneo dell'energia meccanica totale. Questo metodo può dunque essere applicato per la ricerca di ponti acustici o per la valutazione di due diversi sistemi di facciata applicati verso il medesimo ambiente. Dall'analisi della distribuzione dell'intensità trasmessa è possibile evidenziare aree strutturalmente deboli fonte di un'elevata trasmissione acustica. In figura è rappresentato un confronto tratto dal *Manuale di acustica applicata* di Spagnolo capitolo 3 [15] dove viene rappresentato un confronto tra la misura del potere fonoisolante di una finestra con metodo tradizionale e intensimetrico.

La norma UNI EN ISO 15186-2 – Misurazione mediante intensità sonora dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 2: Misurazioni in opera, definisce la metodologia di misura.

Al fine di determinare l'intensità sonora occorre rilevare nello stesso punto e contemporaneamente due grandezze: la velocità e la pressione sonora delle particelle. Viene utilizzata una sonda denominata intensimetrica. La sonda è costituita da due microfoni disposti uno vicino all'altro in grado di rilevare pressione e velocità per definire il vettore intensità. Le condizioni di prova per condurre



Figura 5.10: Misura con sonda intensimetrica.

la misura prevedono di verificare che la pressione sonora e il livello di intensità siano maggiori di 10 dB rispetto al livello di pressione sonora di sottofondo. La prima operazione da compiere per effettuare questa misura è dividere la parete da testare in elementi più piccoli. Il numero di elementi in cui si divide la facciata è funzione dell'omogeneità della parete. Per ogni elemento la norma prevede di condurre una doppia scansione della superficie come rappresentato in figura. La norma indica di posizionare la sonda per la scansione della parete ad una distanza tra i 0,1 e 0,3 metri dalla parete testata. Viene presentata la procedura per verificare se la misura è significativa e quindi ripetibile verificando che la differenza di livello di intensità misurato durante le due scansioni della facciata sia inferiore o uguale a 1 dB.

I principali errori di misura derivanti dall'applicazione di questa tecnica sono relativi all'errore nella tecnica di trasduzione dei segnali imputabile al sensore e alla tipologia del campo acustico.

La misura dell'isolamento acustico avviene con riferimento ad un intervallo minimo di frequenze compreso tra 100 e 3150 Hz per le bande di terzi d'ottava e fra 125 e 2000 Hz per le bande d'ottava. Entrambi i metodi forniscono valori del potere fonoisolante in frequenza. Per ottenere un valore unico è possibile applicare la norma ISO 717-1.

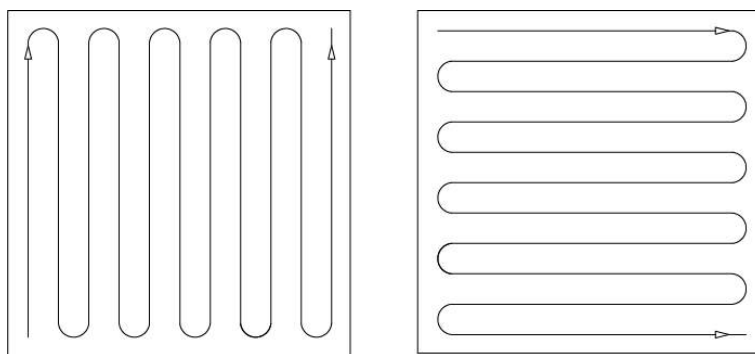


Figura 5.11: Schema delle scansioni da effettuare con la sonda intensimetrica sulla parete da testare.

5.1.3 Misure di prestazione luminosa in campo

Le misure sperimentali di prestazione luminosa si dividono in: misure di trasmissione luminosa e di valutazione delle luminanze. Come definito nel paragrafo 3.3 lo scopo della misura è di determinare le proprietà di trasmissione luminosa degli elementi trasparenti studiati al fine di determinare la quantità di luce naturale trasmessa attraverso l'involucro studiato. Allo stesso tempo le analisi di luminanza hanno permesso di verificare se le condizioni di comfort visivo sono garantite per quel che riguarda il discomfort da abbagliamento.

Misura di trasmissione luminosa

Le misure di trasmissione luminosa sono state effettuate con due diverse tipologie di strumenti: misure spot con luxmetro portatile e misure continue con luxmetro connesso al sistema di acquisizione. Il luxmetro restituisce valori di

illuminamento in lux, definito come il rapporto tra il flusso luminoso (*lumen*) che attraversa una superficie e l'area della superficie considerata (m^2). L'elemento sensibile della sonda è in silicio (materiale semiconduttore fotovoltaico) e genera una corrente che viene misurata da un galvanometro. La corrente generata risulta proporzionale alla quantità di energia luminosa incidente e quindi la sua misura conduce, mediante opportune scale di conversione, alla misura dell'illuminamento.

I principali errori di misura di questo strumento derivano dall'inclinazione con cui i raggi solari incidono sullo strumento e dal fatto che la risposta della fotocellula alle diverse lunghezze d'onda della radiazione solare può differire rispetto a quella dell'occhio umano. Per quel che concerne il primo errore di misura i sensori dispongono di una calotta di copertura dell'elemento sensibile studiata in modo che l'angolo di incidenza con cui la radiazione incide sull'elemento sensibile sia il più possibile vicino alla perpendicolare. Per la seconda tipologia di errore il produttore fornisce con lo strumento una curva di visibilità che rappresenta la risposta all'energia luminosa dello strumento, più la curva è vicina alla curva fotopica di sensibilità relativa $V(\lambda)$, minore sarà l'errore dello strumento. Praticamente è possibile ridurre questa tipologia di errore applicando particolari filtri da disporre sull'elemento fotosensibile. In fase di taratura dei dati raccolti si tiene conto del coefficiente di trasmissione luminosa dei filtri. Altri errori di misura sono funzione dei difetti di linearità del rapporto illuminamento-corrente o possono derivare da elevati scostamenti dalla temperatura a cui lo strumento è stato tarato rispetto a quella misurata. L'accuratezza dello strumento portatile (Minolta LS100) è di $\pm 5\%$. Lo strumento dopo essere stato acceso si regola sullo zero posizionando il cappuccio sulla parte sensibile.

Lo strumento da connettere all'acquisitore per misure di illuminamento continuo (Delta Ohm LP PHOT 02) prima della messa in campo, è necessario posizionare dei cristalli di silica-gel in grado di assorbire l'umidità nella camera della cupola, che in particolari condizioni climatiche può portare alla formazione di condensa sulla parete interna della cupola alterando la misura. La sensibilità (in mV/klux) del luxmetro permette di determinare l'illuminamento misurando un segnale in Volt.

$$E = \frac{x \cdot 1000}{k} \text{ [lux]} \quad (5.7)$$

dove:

E è l'illuminamento [lux],

x è il valore di tensione misurato [mV],

k è la sensibilità del luxmetro [mV/klux].

Misure di comfort visivo

Con lo strumento di misura video-luminanzometro si sono effettuate delle misure di luminanza all'interno degli ambienti studiati per verificare le condizioni di comfort luminoso secondo quanto descritto nel paragrafo 3.3. Lo strumento utilizzato (Image Luminance Measurement Device) modello LMK 98-3, prodotto dalla TechnoTeam GmbH, è in grado di mappare le luminanze in ambiente prodotte da luce naturale. Lo strumento restituisce un'immagine digitale della scena inquadrata in cui ad ogni pixel corrisponde un valore di luminanza. Attraverso il software in dotazione con lo strumento, è possibile identificare



Figura 5.12: Luxmetro portatile a sinistra e luxmetro per misure in continuo.

aree di qualunque forma sull'immagine di luminanza e leggerne il valore medio di luminanza (calcolato come valore medio della luminanza di ciascun pixel appartenente all'area).

5.1.4 Misura di portata con gas traccianti ad emissioni costante

Lo scopo della misura è determinare la portata d'aria che fluisce all'interno delle intercapedini vetrate caratterizzate da ventilazione meccanica o naturale.

La portata di ventilazione nell'intercapedine delle FTA analizzate è stata monitorata attraverso la tecnica dei gas traccianti ad emissione costante. La tecnica consiste nell'immissione nel condotto di una portata nota (poiché misurata) di un gas tracciante (q [m^3/h]) normalmente assente nella composizione dell'aria atmosferica.

Nell'ipotesi che il tracciante si distribuisca uniformemente nel fluido (in questo caso aria), la concentrazione di tracciante misurata a valle dell'immissione (C [ppm]) può essere correlata alla portata del fluido in oggetto attraverso la relazione:

$$Q = \frac{q}{C} \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (5.8)$$

Minore sarà la concentrazione di tracciante rilevato, maggiore sarà la portata del fluido. La misura è stata effettuata per le due cellule. Il tracciante (SF_6) è stato immesso dalle bocchette che estraggono aria dall'ambiente per immetterla nell'intercapedine. La concentrazione di gas è stata rilevata nel canale di estrazione (in modo da far sì che fosse perfettamente miscelato con l'aria di ventilazione).

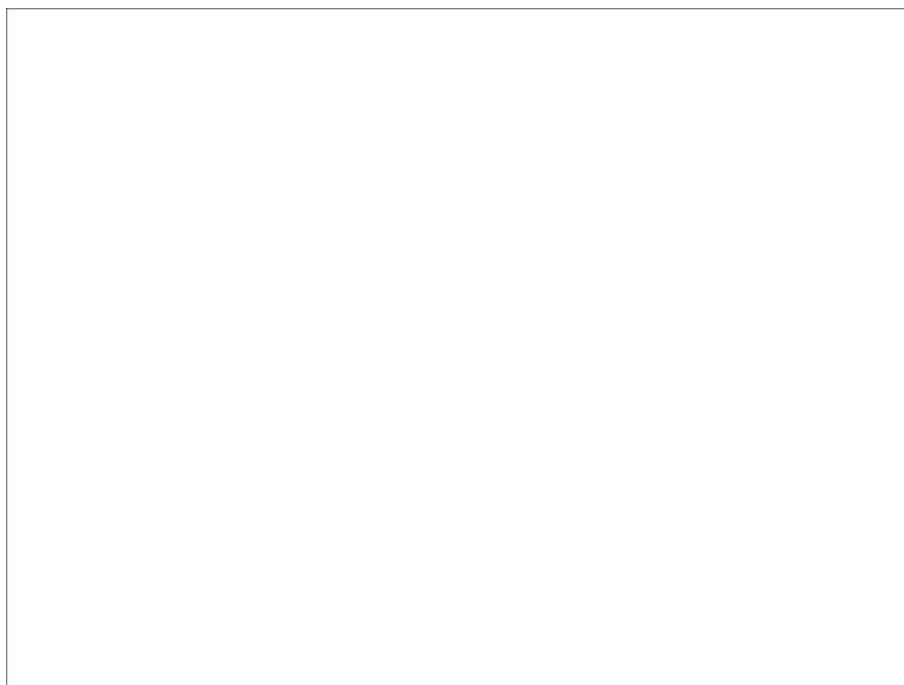


Figura 5.13: Misure con video luminanzometro. *Omissis*

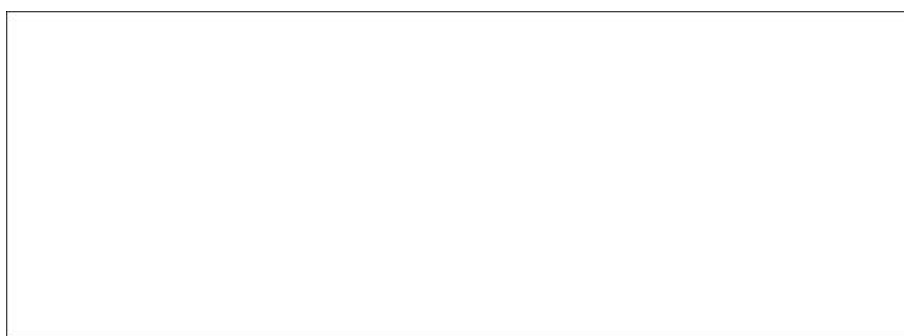


Figura 5.14: Misure di portata d'aria nell'intercapedine di una FTA con gas traccianti ad emissioni costanti. *Omissis*

Capitolo 6

Elaborazione dei dati sperimentali e proposta di nuovi indicatori prestazionali

Nel capitolo è presentata la metodologia di analisi dei dati sperimentali. In particolare nella prima parte vengono identificati i diversi parametri calcolati attraverso i dati raccolti in campo per componenti e sistemi di involucro trasparente. Sono poi definiti i parametri sintetici per caratterizzare i sistemi di FTA analizzati e vengono introdotti e discussi nuovi parametri sintetici. Nella seconda parte del capitolo si investigano delle metodologie di elaborazione dei dati sperimentali al fine di verificare la validità dei parametri prestazionali tradizionali per caratterizzare le FTA con comportamento dinamico.

La prima fase dell'elaborazione dei dati sperimentali riguarda la verifica del corretto funzionamento del sistema di acquisizione. Una volta scaricati i dati dal sistema di acquisizione la prima elaborazione è definita “data cleaning”. Vengono eliminati i valori derivanti da un errore di lettura.

La seconda fase riguarda la trasformazione dei dati raccolti ogni 15 minuti in valori orari.

6.1 I parametri per la valutazione energetica

6.1.1 Flussi termici ed energie

I flussi termici

I flussi termici superficiali (\dot{q} in W/m^2) sono rilevati dai termoflussimetri posizionati sull'elemento testato. Definiscono il flusso termico scambiato tra l'elemento in analisi e l'ambiente interno comprensivo della quota dovuta alla differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno e alla quota solare assorbita dall'elemento testato e riemessa in ambiente. Durante le elaborazioni ci si riferisce a valori medi di flusso termico superficiale quando il valore è ricavato dalla media di tre diverse misure da tre sensori posizionati a tre diverse altezze della facciata.

I flussi solari o irradianza solare (I in W/m^2) sono rilevati dai solarimetri. Nelle analisi sperimentali si distinguono tra valori esterni di irradianza incidente sull'elemento in analisi (I_{out}), valori di irradianza incidente sul piano orizzontale (I_h) e irradianza trasmessa dall'elemento testato (I_{in}).

I flussi termici totali ($\dot{q}_{tot-monit}$ in W/m^2) si determinano come la somma del flusso termico specifico e la quota misurata dal solarimetro interno:

$$\dot{q}_{tot-monit} = \dot{q} + I_{in} \quad (6.1)$$

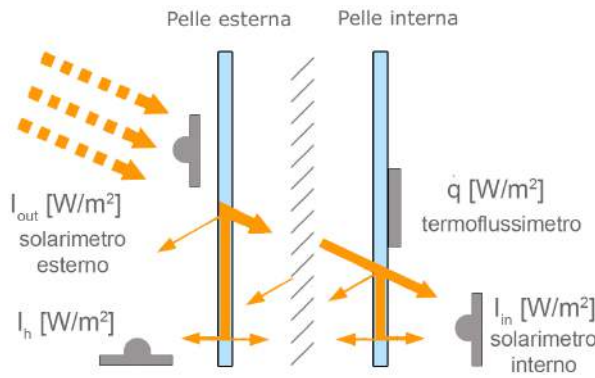


Figura 6.1: Schema della posizione dei sensori di misura, solarimetri esterno verticale e orizzontale, interno e termoflussimetro.

Le energie

Energia giornaliera (E_{24} in Wh/m^2) è l'integrale tra le 00.00 e le 24.00 del flusso termico superficiale:

$$E_{24} = \int_{00:00}^{24:00} \dot{q}(\tau) d\tau \quad (6.2)$$

Energia giornaliera totale (E_{tot24} in Wh/m^2) è l'integrale tra le 00.00 e le 24.00 del flusso termico totale:

$$E_{tot24} = \int_{00:00}^{24:00} \dot{q}_{tot}(\tau) d\tau \quad (6.3)$$

Energia giornaliera solare (E_{s24} in Wh/m^2) è l'integrale tra le 00.00 e le 24.00 del flusso solare (esterno o interno):

$$E_{tots} = \int_{00:00}^{24:00} I(\tau) d\tau \quad (6.4)$$

Energia giornaliera dovuta alla sola differenza di temperatura ($E_{24\Delta t}$ in Wh/m^2) è l'integrale tra le 00.00 e le 24.00 del flusso termico:

$$E_{24\Delta t} = \int_{00:00}^{24:00} \dot{q}_{\Delta t}(\tau) d\tau \quad (6.5)$$

$$\dot{q} = U \cdot \Delta t \quad (6.6)$$

Dove:

U è la trasmittanza termica dell'elemento testato in W/m^2K , che si ipotizza essere costante durante il giorno

Δt è la differenza di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno.

Energia (E in Wh/m^2) utilizzata per valutare la prestazione di componente o un sistema durante un periodo più lungo (solitamente una stagione). Si calcola come la somma delle energie giornaliere totali o non per il periodo in analisi.

Energia normalizzata (E_n in Wh/m^2GG) viene calcolata al fine di confrontare tecnologie che presentano condizioni al contorno diverse. Si è utilizzato una normalizzazione rispetto ai gradi giorno (GG), calcolati come la somma delle differenze tra la temperatura dell'aria interna e quella esterna. Il valore di energia normalizzata può essere calcolata per giornate (E_{24n}) o periodi di analisi (E_n).

$$E_n = \frac{E}{GG} \quad (6.7)$$

6.1.2 I parametri prestazionali sintetici

Trasmittanza termica equivalente è stata definita nel paragrafo 3.1.1. Secondo la definizione del parametro, noto il flusso termico e la differenza di temperatura in condizioni stazionarie è possibile calcolare la trasmittanza termica dell'elemento testato. Durante le misure in campo le condizioni di prova non possono considerarsi stazionarie. Tramite l'elaborazione dei dati sperimentali, si è calcolato la trasmittanza termica equivalente, applicando a un elevato numero di letture sperimentali, il metodo delle regressioni lineari:

$$\dot{q} = U \cdot (t_{int} - t_{ext}) \quad (6.8)$$

Sull'asse delle x si sono rappresentati le differenze di temperatura e su quello delle y i flussi termici superficiali. Il coefficiente angolare della retta di interpolazione della nuvola di punti rappresenta il valore di trasmittanza termica in W/m^2K . I risultati con valori di R^2 maggiormente vicini all'unità (vedi l'appendice 11.2) si sono ottenuti utilizzando i dati invernali notturni. In questo modo si riducono al minimo le dinamiche del sistema testato e ci si riconduce ad una condizione vicino alla stazionarietà.

La norma ISO 9869 del 1994 "*Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*" definisce un metodo per determinare la trasmittanza termica in opera di componenti opachi, definito come il metodo delle medie progressive. Il metodo non può essere applicato per elementi trasparenti. Non è dunque presente a livello normativo

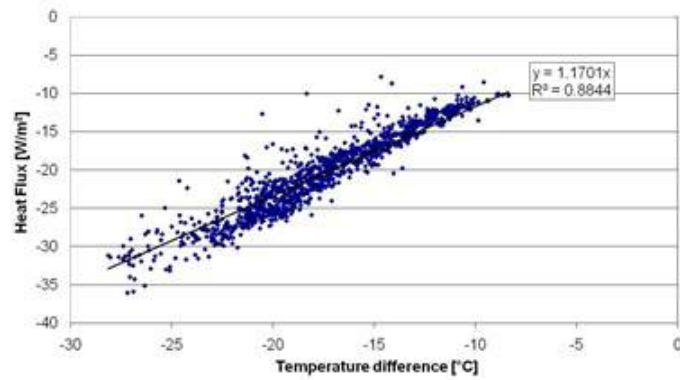


Figura 6.2: Esempio di regressione lineare per la determinazione del valore di trasmittanza termica.

un'indicazione metodologica per la valutazione della trasmittanza termica degli elementi trasparenti. Il principio del metodo delle medie progressive prevede il calcolo del flusso termico medio e la differenza di temperatura media (derivante dalla media progressiva dei valori) per ricavare il valore di trasmittanza termica equivalente. Il metodo può essere applicato se si dispone di un set di dati di almeno 72 h di misura (con temperatura stabile intorno al termoflussimetro) con time step di acquisizione compreso tra la mezza ora e l'ora. Inoltre la norma indica che per elementi leggeri con capacità termica inferiore a $20 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ l'elaborazione dei dati deve essere condotta con i soli dati notturni per evitare l'effetto della radiazione solare.

Conduttanza termica è stata definita nel paragrafo 3.1.1. Valgono le stesse considerazioni riportate nel paragrafo precedente, l'unica differenza è il fatto che il parametro si calcola usando le temperature superficiali interne ed esterne per determinare la differenza di temperatura.

Coefficiente di trasmissione solare è stata definita nel paragrafo 3.1.1. Dai dati sperimentali è possibile calcolare il parametro come rapporto tra il flusso solare misurato dal solarimetro posizionato dietro all'elemento testato e quello esterno, misurato sullo stesso piano. L'andamento di trasmissione solare attraverso l'elemento testato è rappresentato come un andamento orario.

$$\tau_s = \frac{I_{in}}{I_{out}} [-] \quad (6.9)$$

Fattore solare equivalente è stato definito nel paragrafo 3.1.1. Valutare sperimentalmente questo parametro è abbastanza complesso in quanto non è semplice misurare in campo la quota di flusso termico q_i (assorbita e riemessa verso l'ambiente interno dal componente trasparente). Infatti misurando il flusso termico con il termoflussimetro non si è in grado di dividere la quota di flusso termico dovuta alla differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno

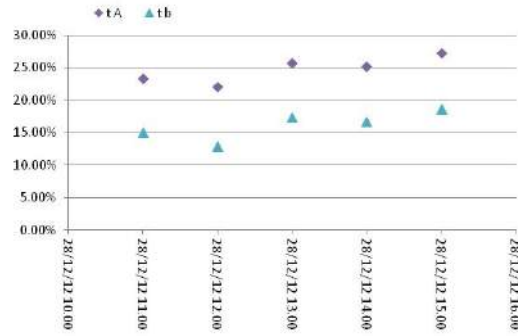


Figura 6.3: Esempio di andamento del coefficiente di trasmissione solare.

dalla quota di radiazione solare assorbita dal componente e riemessa in ambiente. Nelle analisi sperimentali si è arrivati alla determinazione di un parametro equivalente calcolato come:

$$TSET^* = \frac{E_{24tot} - E_{24}}{E_{24in}} \quad (6.10)$$

dove si indica con:

E_{24tot} la quota di energia giornaliera totale che attraversa la facciata come definito nell'equazione 6.3 in Wh/m^2 ,

E_{24} la quota di energia giornaliera che attraversa l'elemento testato secondo l'equazione 6.5 in Wh/m^2 ,

E_{24in} l'energia solare giornaliera incidente sulla facciata secondo l'equazione 6.4 in Wh/m^2 .

Attraverso questo calcolo è possibile determinare il valore di $TSET^*$ giornaliero. Questo metodo presenta diverse criticità. Innanzitutto si utilizzano i dati sperimentali con le assunzioni di un metodo di calcolo analitico. In secondo luogo si assume che il valore di trasmittanza termica dell'elemento trasparente sia costante durante tutta la giornata. In ultimo si calcola un valore equivalente per la giornata e non un valore orario funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare. Per determinare per via sperimentale il valore del fattore solare si dovrebbe effettuare una misura con un calorimetro [1], non applicabile a misure in test cell o in campo. Lo strumento simula artificialmente la radiazione solare globale incidente sull'elemento vetrato testato. Il valore del fattore solare è determinato valutando la potenza di raffreddamento e riscaldamento fornita all'ambiente del calorimetro per dissipare il flusso termico radiativo emesso dall'elemento studiato.

Efficienza di preriscaldamento ha lo scopo di valutare la capacità della facciata di preriscaldare l'aria che scorre nell'intercapedine ventilata.

Si determina come [35]:

$$\eta = \frac{t_{exh} - t_{inlet}}{t_{in} - t_e} \quad (6.11)$$

dove si indica con:

t_{exh} la temperatura dell'aria in uscita dall'intercapedine,

t_{inlet} la temperatura dell'aria in immissione in intercapedine,
 t_{in} la temperatura dell'aria in ambiente,
 t_e la temperatura dell'aria esterna.

Il parametro viene calcolato per caratterizzare il funzionamento di facciate trasparenti nel periodo invernale quando la temperatura dell'aria esterna è minore rispetto a quella interna. L'efficienza η dal punto di vista fisico, rappresenta dunque il rapporto tra il flusso entalpico relativo al preriscaldamento dell'aria che fluisce in intercapedine e il flusso entalpico richiesto per scaldare l'aria di ventilazione [72].

Se $\eta < 0$ la temperatura dell'aria estratta attraverso la facciata t_{exh} è inferiore alla temperatura dell'aria interna e non c'è quindi recupero energetico. La facciata disperde calore e si ha solo un effetto positivo in termini di isolamento dinamico.

Se $0 < \eta < 1$ l'aria estratta è preriscaldata, ma l'incremento di temperatura che subisce è inferiore alla differenza tra la temperatura interna ed esterna, e quindi l'aria di ventilazione deve essere ulteriormente riscaldata prima di essere immessa in ambiente.

Se $\eta = 1$ la facciata teoricamente è in grado di compensare completamente le perdite per ventilazione.

Se $\eta > 1$ la facciata scalda l'aria ad una temperatura maggiore della temperatura ambiente e quindi compensa completamente le perdite per ventilazione e può compensare anche ulteriori dispersioni termiche.

Nel lavoro di ricerca sullo stato dell'arte di *G. Quesada et al.* [74] sono riportati i valori dell'efficienza di preriscaldamento valutati da *McEvoy et al.*. I risultati, calcolati da dati raccolti durante campagne sperimentali effettuate in test cell, mostrano che aumentando la portata d'aria di ventilazione in intercapedine si riduce l'efficienza di pre-riscaldamento. In particolare con una portata di 13 l/s, l'efficienza di preriscaldamento è del 50% del carico di ventilazione con radiazione solare incidente di 800 W/m², e scende al 75% con portate di 8 l/s [74].

Nel lavoro di *Corgnati et al.* [35], sono presentati i risultati di efficienza di preriscaldamento per una facciata climatica a Torino. Nel periodo di riscaldamento la facciata presenta valori di η minori di zero per circa il 70% del tempo. Questo significa che la facciata non è in grado di preriscaldare l'aria che scorre nella facciata per la maggior parte del tempo [35].

Efficienza di isolamento dinamico definisce la capacità della facciata di asportare i carichi solari grazie all'aria che fluisce in intercapedine. In condizioni estive l'aria estratta dall'ambiente interno, fluendo all'interno dell'intercapedine, può ridurre parte dei carichi termici (solari e di trasmissione) che gravano sulla facciata, riducendo in questo modo i carichi entranti nell'ambiente interno [72]. Il parametro dunque caratterizza tipicamente il comportamento di una facciata durante il periodo estivo ed è stato definito come [35]:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}_{inc}} \quad (6.12)$$

dove:

\dot{Q}_r è il flusso termico rimosso dall'aria di ventilazione nell'intercapedine della

facciata $[W]$

\dot{Q}_{inc} è il flusso termico entrante attraverso la facciata $[W]$.

Si possono scrivere come:

$$\dot{Q}_r = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{exh} - t_{inlet}) \quad (6.13)$$

$$\dot{Q}_{inc} = I \cdot \alpha_0 + \dot{q} \cdot A \quad (6.14)$$

Scrivendo l'equazione di conservazione dell'energia, il flusso termico incidente sulla facciata sarà uguale a:

$$I_{out} \cdot \alpha_0 + \dot{q} \cdot A = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{exh} - t_{inlet}) + \dot{q} \cdot A + \dot{q}_s \cdot A \quad (6.15)$$

Quindi ε :

$$\varepsilon = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{exh} - t_{inlet})}{\dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{exh} - t_{inlet}) + \dot{q} \cdot A + \dot{q}_s \cdot A} \quad (6.16)$$

dove:

\dot{m} è la portata d'aria in intercapedine $[kg/s]$,

c_p è il calore specifico dell'aria $[J/kgK]$,

\dot{q} è il flusso termico trasmesso attraverso la facciata $[W/m^2]$ moltiplicato per l'area della facciata $[m^2]$,

\dot{q}_s è il flusso termico solare entrante attraverso la facciata $[W/m^2]$ moltiplicato per l'area della facciata $[m^2]$ (rilevato dal solarimetro interno I_{in}),

t_{exh} è la temperatura dell'aria in uscita dall'intercapedine $[^\circ C]$,

t_{inlet} è la temperatura dell'aria in ingresso in intercapedine $[^\circ C]$.

Da un punto di vista fisico ε rappresenta la quota di flusso entrante attraverso la frontiera esterna della facciata, che viene asportata dall'aria di ventilazione nell'intercapedine. Il parametro viene calcolato solo quando \dot{Q}_r è maggiore di zero e quindi il flusso termico è entrante in ambiente. I valori di ε possono variare tra 0 e 1, dove zero significa che la facciata non è in grado di rimuovere nessun carico termico attraverso l'aria di ventilazione e 1 che la facciata è perfettamente in grado di rimuovere il carico solare che incide sulla pelle esterna grazie all'aria di ventilazione in intercapedine. Più ε è elevato maggiore sarà il potenziale di isolamento dinamico della facciata. Il parametro è stato calcolato per una facciata climatica a Torino [35] nel lavoro di *Corgnati et al.* e i valori di efficienza calcolati cadono tra il 40% e il 65 % per la maggior parte del tempo, con portate d'aria di $60 \text{ m}^3/h$. Il range dell'efficienza aumenta a 55-75% per portate di $90 \text{ m}^3/h$.

Fattore correttivo (b_{tr}^*) Un nuovo parametro per valutare l'efficienza di isolamento di sistemi vetrati attivi (FTA) è proposto [45]. Il parametro è stato sviluppato partendo dal b_{trx} delle norme UNI TS 11300, dove si applica questo coefficiente correttivo per correggere la differenza di temperatura che si ha per il flusso termico verso ambienti non riscaldati. Si è seguito lo stesso principio per caratterizzare gli scambi termici delle FTA. Nel periodo invernale la pelle interna vetrata disperde calore verso l'intercapedine, l'aria in intercapedine si trova ad una temperatura superiore rispetto a quella dell'aria esterna e quindi le dispersioni termiche sono inferiori rispetto ad un sistema di facciata a pelle singola che si trova a diretto contatto con l'aria esterna. La riduzione di

flusso termico derivante dalla presenza dell'intercapedine è caratterizzata dal parametro (b_{tr}^*):

$$b_{tr}^* = \frac{t_{out} - t_{cav}}{t_{cav} - t_{in}} \quad (6.17)$$

Dove:

t_{cav} è la temperatura media dell'aria in intercapedine [$^{\circ}\text{C}$],

t_{in} è la temperatura dell'aria interna dell'ambiente [$^{\circ}\text{C}$],

t_{out} è la temperatura dell'aria esterna [$^{\circ}\text{C}$].

Si possono presentare diverse condizioni:

$b_{tr}^* < 0$, la temperatura dell'aria nell'intercapedine della FTA t_{cav} è inferiore a quella dell'aria esterna e quindi le dispersioni termiche attraverso l'intercapedine sono maggiori rispetto ad una configurazione di facciata a pelle singola.

$b_{tr}^* = 0$, la temperatura dell'aria nell'intercapedine della FTA t_{cav} è uguale alla temperatura dell'aria esterna e quindi le dispersioni attraverso l'involucro non sono influenzate dalla presenza dell'intercapedine.

$0 < b_{tr}^* < 1$, la temperatura dell'aria nell'intercapedine della FTA t_{cav} è più alta della temperatura dell'aria esterna t_{out} e quindi le dispersioni termiche attraverso l'involucro sono inferiori grazie alla presenza dell'intercapedine rispetto ad una configurazione di pelle singola.

$b_{tr}^* = 1$, la temperatura dell'aria nell'intercapedine t_{cav} è uguale alla temperatura dell'aria interna, non si hanno dispersioni termiche.

$b_{tr}^* > 1$, la temperatura dell'aria nella cavità è più elevata della temperatura dell'aria interna e quindi si avrebbero dei flussi termici entranti attraverso l'involucro.

6.1.3 Valutazione dei parametri prestazionali tradizionali

Partendo dai dati sperimentali raccolti durante diverse campagne di monitoraggio di FTA si sono effettuate delle analisi per verificare se i parametri prestazionali tradizionali, trasmittanza termica e fattore solare (U e g), potessero caratterizzare le prestazioni dinamiche di queste tecnologie in modo corretto [46], [24]. I dati sperimentali raccolti durante i monitoraggi dei casi studio delle FTA, le cui caratteristiche sono presentate nel capitolo casi studio, sono stati divisi in due set di dati contenenti la stessa quantità di dati sperimentali per ogni stagione in analisi. Il primo set è stato utilizzato per calcolare i parametri prestazionali equivalenti U^* e g^* con il metodo della regressione lineare.

I parametri prestazionali sono stati ricavati con le equazioni di flusso termico totale (equazione 6.1)

Con l'analisi di regressione lineare si intende la verifica dell'ammissibilità della relazione funzionale, e, in caso affermativo, la determinazione di una stima della funzione f che lega la variabile risposta alle variabili esplicative (o ad un sottoinsieme di esse). Con questo metodo si definisce la relazione lineare tra variabili indipendenti (x_1, x_2, x_n) e variabili dipendenti y . La funzione f è la retta che minimizza le distanze tra i valori osservati di tipo y e x [70].

Si sono effettuate analisi con il metodo della regressione lineare semplice e multipla. Nel primo caso nella funzione compare una sola variabile esplicativa, mentre nel secondo diverse.

L'equazione generale di una regressione lineare semplice è :

$$y = \alpha \cdot x + \alpha_0 + E \quad (6.18)$$

Per le regressioni lineari multiple è:

$$y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_n \cdot x_n + \beta_0 + E \quad (6.19)$$

Il termine E viene indicato in statistica come *residuo* o *errore*. Il residuo descrive scostamenti dal valore atteso imputabili a cause aleatorie (errori di misura, dipendenze da variabili, valutazioni soggettive) [70]. Per le regressioni lineari multiple si propongono tre diversi modelli, per identificarli il primo presenta come coefficienti di regressione la lettera β , il secondo γ e il terzo δ .

Lo scopo dell'elaborazione è determinare i coefficienti α , β , γ e δ .

Se α_0 , β_0 , γ_0 o δ sono uguali a zero la retta di regressione passerà per l'origine, altrimenti se sono diversi da zero la retta di regressione presenterà un termine noto e non passerà per l'origine.

Il secondo set di dati sperimentali è stato utilizzato per validare i parametri calcolati.

La bontà della regressione lineare è stata definita calcolando l'indice di determinazione della regressione lineare R^2 (definito nell'appendice 11.2).

Elaborazione dei dati sperimentali con il metodo della regressione lineare

L'equazione della funzione di regressione per il calcolo del flusso termico totale che attraversa un elemento trasparente è:

$$\dot{q}_{tot} = U \cdot (t_{out} - t_{in}) + g \cdot I_{out} \quad (6.20)$$

L'equazione 6.20 è stata divisa in due equazioni per valutare tramite regressione lineare semplice i coefficienti α e α' che corrispondono rispettivamente al valore di trasmittanza termica equivalente in $[W/m^2K]$ e al fattore solare equivalente del sistema [-]:

$$y = \alpha \cdot x \longrightarrow \dot{q} = \alpha \cdot \Delta t \quad (6.21)$$

$$y = \alpha' \cdot x \longrightarrow \dot{q}_s = \alpha' \cdot I_{out} \quad (6.22)$$

$$\dot{q}_s = (\dot{q} + I_{in}) - \alpha \cdot \Delta t \quad (6.23)$$

dove:

\dot{q} è il flusso termico specifico misurato dal termoflussimetro sulla facciata in analisi W/m^2 ,

\dot{q}_s è il flusso termico a bassa lunghezza d'onda dovuto alla radiazione solare trasmessa W/m^2 ,

I_{out} e I_{in} rappresentano rispettivamente il valore di irradianza solare incidente sulla facciata e il valore trasmesso attraverso la facciata W/m^2 ,

Δt rappresenta la differenza di temperatura tra l'aria esterna e quella interna °C.

Per determinare \dot{q}_s si è utilizzato l'equazione 6.23 perché non è possibile determinare il valore del flusso termico solare totale direttamente per via sperimentale. Infatti come descritto nel paragrafo 6.1.2, non si riesce a definire la quota di radiazione solare assorbita dall'elemento trasparente e riemessa all'interno dell'ambiente attraverso i dati misurati.

Il valore di α è stato calcolato con i soli dati notturni mentre per il calcolo del coefficiente α' si sono utilizzati i dati sperimentali diurni quando il valore di irradianza solare trasmessa era maggiore di $10 W/m^2$ ($I_{in} > 10 W/m^2$, posizione

dei sensori figura 6.1).

Validazione dei parametri calcolati con il metodo della regressione lineare

Una volta calcolati i parametri prestazionali equivalenti, con i coefficienti di regressione α , utilizzando il secondo set di dati si è verificata la loro validità. Con i parametri prestazionali equivalenti è stato possibile calcolare i flussi termici e i valori di energia giornaliera che attraversano il sistema trasparente investigato. Il primo confronto è stato effettuato tra il flusso termico totale monitorato \dot{q}_{tot} (vedi equazione 6.1) e il flusso termico totale calcolato con i parametri α e α' , $\dot{q}_{tot-sim}$ in W/m^2 con l'equazione:

$$\dot{q}_{tot-sim} = \alpha \cdot \Delta t + \alpha' \cdot I_{out} \quad (6.24)$$

Il secondo confronto è stato effettuato tra l'energia giornaliera totale misurata E_{tot24} (vedi equazione 6.3) e l'energia totale giornaliera, calcolata con i parametri α e α' , $E_{tot24-sim}$ in Wh/m^2 :

$$E_{tot24-sim} = \int_{00:00}^{24:00} \dot{q}_{tot-sim}(\tau) d\tau \quad (6.25)$$

Elaborazione dei dati sperimentali con il metodo della regressione multiple

Lo stesso procedimento descritto per le regressioni lineari è stato applicato per determinare i coefficienti β , γ e δ con il metodo delle regressioni lineari multiple (RLM). I coefficienti si sono determinati con il metodo OLS (Ordinary Least Squares regression, il metodo dei minimi quadrati) ¹.

Con il primo set di dati si sono determinati i coefficienti della regressione lineare multipla.

Tre diverse equazioni sono state utilizzate per modellare il comportamento fisico tecnico della facciata investigata un modello base e due modelli avanzati. Ogni modello è stato utilizzato per calcolare i coefficienti della regressione con l'equazione del flusso termico totale e di energia totale.

Il primo modello con RLM definito standard per il flusso termico totale è:

$$\dot{q}_{tot} = \beta \cdot I_{out} + \beta' \cdot (t_{out} - t_{in}) + \beta_0 \quad (6.26)$$

Dove:

\dot{q}_{tot} è il flusso termico totale che attraversa il sistema trasparente (vedi 6.1) [W/m^2],

β è il fattore solare equivalente [-],

β' è la trasmittanza termica equivalente [W/m^2K],

β_0 è il termine che definisce se la retta di regressione passa per l'origine [W/m^2],

I_{out} è il valore di irradianza solare incidente sulla facciata [W/m^2],

¹OLS è uno dei metodi statistici per definire l'equazione che descrive la relazione tra β e \dot{q}

$t_{out} - t_{in}$ è la differenza di temperatura tra l'aria esterna e quella interna in $^{\circ}\text{C}$.

Il primo modello è stato utilizzato sotto forma di energia giornaliera totale calcolata come l'integrale sulle ventiquattro ore dell'equazione 6.26:

$$E_{tot24} = \beta_{(24)} \cdot H_{out} + \beta'_{(24)} \cdot \Delta t_{(24)} + \beta_{0(24)} \quad (6.27)$$

Dove:

E_{tot24} è l'energia giornaliera totale che attraversa la facciata (vedi 6.3) $[\text{Wh}/\text{m}^2]$,

$\beta_{(24)}$ rappresenta il fattore solare equivalente $[-]$,

$\beta'_{(24)}$ rappresenta la trasmittanza termica equivalente $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$,

$\beta_{0(24)}$ rappresenta il termine che definisce se la retta di regressione passa per l'origine $[\text{Wh}/\text{m}^2]$,

H_{out} l'irraggiamento solare giornaliero sulla facciata verticale $[\text{Wh}/\text{m}^2]$,

$\Delta t_{(24)}$ è l'integrale della differenza di temperatura sulle 24 h $^{\circ}\text{C}$.

Il secondo modello con RLM è stato definito con l'equazione:

$$\dot{q}_{tot} = \gamma \cdot I_{out} + \gamma' \cdot (t_{out} - t_{cav}) + \gamma'' \cdot (t_{cav} - t_{in}) + \gamma_0 \quad (6.28)$$

In questo secondo modello il gradiente di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno è diviso in due parti. Infatti la trasmittanza termica equivalente del sistema è divisa in due coefficienti γ' e γ'' in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, che vengono rispettivamente moltiplicati per la differenza di temperatura dell'aria esterna t_{out} meno quella in intercapedine t_{cav} e la differenza tra la temperatura dell'aria in intercapedine t_{cav} e quella dell'aria interna t_{in} . Il modello è stato utilizzato per valutare i coefficienti γ con l'equazione di regressione delle energie:

$$E_{tot24} = \gamma_{(24)} \cdot H_{out} + \gamma'_{(24)} \cdot \Delta t^{o-c} + \gamma''_{(24)} \cdot \Delta t^{c-i} + \gamma_{0(24)} \quad (6.29)$$

Il terzo modello con RLM è stato definito con l'equazione:

$$\dot{q}_{tot} + \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{inlet} - t_{exh}) = \delta \cdot I_{out} \cdot A + \delta' \cdot (t_{out} - t_{in}) \cdot A + \delta_0 \quad (6.30)$$

Dove:

\dot{m} è la portata d'aria in intercapedine $[\text{kg}/\text{s}]$,

c_p è il calore specifico dell'aria in intercapedine che è stato assunto costante e pari a $1000 [\text{J}/\text{kgK}]$,

t_{inlet} è la temperatura dell'aria in ingresso nell'intercapedine $^{\circ}\text{C}$,

t_{exh} è la temperatura dell'aria in uscita dall'intercapedine $^{\circ}\text{C}$,

A è la superficie della facciata testata in prospetto $[\text{m}^2]$.

L'equazione è stata utilizzata per determinare i coefficienti di RLM δ e δ' che sono rispettivamente adimensionale e in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. In questo modello parte dell'equazione è uguale a quella dei modelli precedenti già discussi, e definisce il flusso termico totale che attraversa la facciata, mentre il nuovo termine introdotto definisce la quota di flusso entalpico asportata dall'aria di ventilazione in intercapedine.

Integrando sulle ventiquattro ore l'equazione 6.30 si sono calcolati i coefficienti di regressione $\delta_{(24)}$ con:

$$E_{tot24} = \delta_{(24)} \cdot H_{out} \cdot A + \delta'_{(24)} \cdot \Delta t^{o-i} \cdot A - \int_{00:00}^{24:00} \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{inlet} - t_{exh}) + \delta_{0(24)} \quad (6.31)$$

Tutti i modelli sono stati applicati imponendo β_0 , γ_0 e $\delta_0=0$ e quindi valutando i coefficienti β , γ e δ con una retta di regressione passante per l'origine e calcolando i coefficienti con una retta non passante per il centro e quindi β_0 , γ_0 , $\delta_0 \neq 0$.

Validazione dei parametri calcolati con il metodo della regressione multiple

Come per le regressioni lineari semplici anche per le multiple una volta determinati i coefficienti β , γ e δ si è verificato la loro validità calcolando i flussi termici totali e le energie totali con i coefficienti calcolati con le regressioni lineari multiple. Per questa fase si sono utilizzati i dati sperimentali del SET 2, dati diversi da quelli utilizzati per effettuare le regressioni lineari.

6.2 Valutazione delle prestazioni acustiche

La misura è stata condotta secondo quanto descritto nel paragrafo 5.1.2.

I dati rilevati sono stati elaborati secondo le indicazioni della norma UNI 717-1 "Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio". Lo scopo della norma è definire un metodo per calcolare *l'indice di valutazione dell'isolamento acustico per via aerea* attraverso dati sperimentali. L'indice è definito come: il valore in decibel della curva di riferimento a 500 Hz dopo spostamento della curva secondo il metodo specificato nella norma.

I valori di riferimento per rumori per via aerea sono definiti nella tabella del prospetto 3.

Il confronto viene effettuato avvicinando con passi di 1 dB la curva di riferimento appropriata, alla curva misurata, fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli è il più grande possibile e comunque non maggiore di 32,0 dB (per misurazioni in 16 bande di terzo d'ottava). Il valore in decibel della curva di riferimento a 500 Hz è il valore di $D_{nT,w}$. E' inoltre necessario calcolare due termini di adattamento allo spettro riportati nella norma C (rumore rosa ponderato A) e C_{tr} (rumore di traffico urbano ponderato A).

Questi termini di adattamento dello spettro hanno segno negativo e quindi riducono l'indice di potere fonoisolante. Sono stati introdotti per correggere il valore dell'indice di valutazione quando è riferito ad una situazione pratica in cui è prevista una sorgente di rumore riconducibile al rumore rosa ponderato A (C) utilizzato per descrivere rumori di ambienti interni (parlato, televisione, musica) o al rumore di traffico urbano ponderato A (Ctr).

6.3 Valutazione del prestazioni luminose

Trasmissione luminosa è stato valutata come il rapporto tra l'illuminamento interno rilevato sul piano verticale e l'illuminamento esterno (descrizione della

misura nel paragrafo 6.4):

$$\tau_l = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \quad (6.32)$$

Dove:

E_{int} è il valore di illuminamento rilevato all'interno [lux],

E_{ext} è il valore di illuminamento rilevato all'esterno [lux].

Come per il coefficiente di trasmissione solare l'andamento di trasmissione luminosa è rappresentato come un andamento orario, che varia in funzione della quantità e dell'angolo di incidenza della radiazione solare.

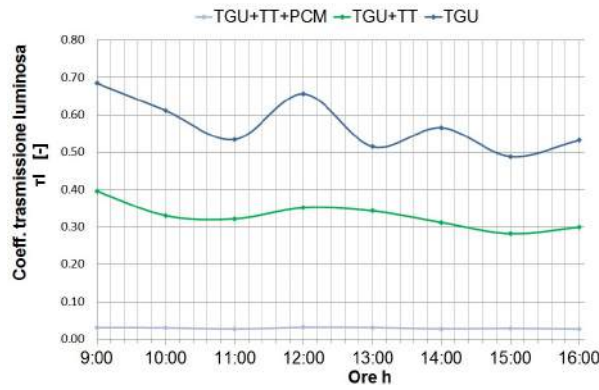


Figura 6.4: Esempio di andamento di trasmissione luminosa di tre diverse tecnologie vetrate a confronto.

6.4 Valutazione del comfort ambientale

Comfort termico

Secondo quanto definito nel paragrafo 3.4 si sono valutate le condizioni di comfort termico derivanti dall'applicazione di sistemi trasparenti di facciata.

La valutazione delle condizioni di comfort è avvenuta calcolando gli indicatori PMV , PMV^* e PPD definiti nel paragrafo 3.4 secondo le equazioni 3.17, 3.20 e 3.18.

L'analisi è stata condotta creando delle mappe di valori di PMV nell'ambiente modellato con il software di calcolo HyperComfort sviluppato dal Politecnico di Torino, dip. di Energetica nel 2000.

Rispetto agli altri indicatori di prestazione in questo caso si passa dall'analisi a livello di componente a quella di ambiente, calcolando un parametro di comfort globale ambientale.

Al fine di valutare la condizione di comfort ambientale derivante dall'applicazione di una particolare tecnologia vetrata, si sono assunte come adiabatiche le altre pareti dell'ambiente studiato e si è assunto che la loro temperatura è uguale a quella dell'aria interna.

Gli input nel modello sono stati dunque:

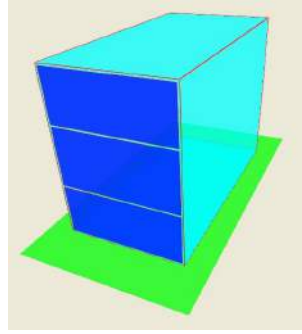


Figura 6.5: Esempio di modello tridimensionale di una cella di prova simulata con HyperComfort.

- la temperatura superficiale interna della tecnologia studiata,
- la temperatura dell'aria interna.

Gli altri parametri per il calcolo del PMV sono stati assunti da normativa e sono riportati in tabella 6.1.

Tabella 6.1: Parametri di ingresso assunti secondo indicazioni della norma UNI EN ISO 7730/2006.

Periodo	M [met]	Iclo [clo]	U.R. [%]	v_{air} [m/s]
Estate	1,2	0,5	50	0,10
Autunno	1,2	0,7	50	0,10
Inverno	1,2	1	50	0,10
Primavera	1,2	0,7	50	0,10

Le condizioni di comfort termico nell'ambiente simulato sono state valutate dividendo l'ambiente in classi di comfort in funzione del valore di PMV calcolato secondo le indicazioni della norma UNI EN ISO 7730/2006:

- classe A, - 0,2 < PMV < + 0,2
- classe B, - 0,5 < PMV < + 0,5
- classe C, - 0,7 < PMV < + 0,7

Sulla base della distribuzione spaziale vengono individuate le aree di pavimento relative alle diverse classi e vengono calcolate le percentuali rispetto alla superficie totale di pavimento dell'ufficio. Il valore puntuale di comfort è valutato ad una distanza di 0,75 m dalla facciata e ad un'altezza di 60 cm dal pavimento (altezza indicata dalla normativa per persona seduta), che nell'ambiente tipo considerato può rappresentare la posizione della postazione di lavoro più vicina alla facciata stessa. Tale valore indica se la zona adiacente la facciata è sfruttabile per una postazione di lavoro, oppure se il suo utilizzo è sconsigliato a causa delle condizioni di discomfort.

Comfort luminoso

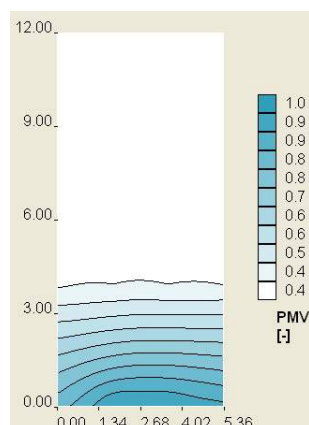


Figura 6.6: Esempio di mappa di valori di PMV in un ambiente testato con HyperComfort.

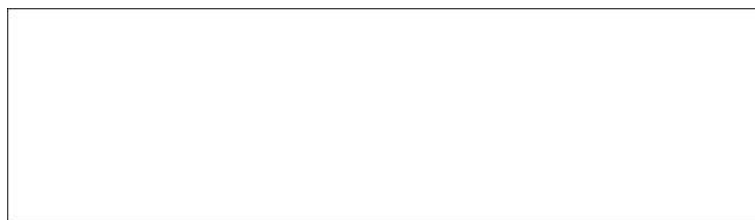


Figura 6.7: Esempio di mappe di luminanza. *Omissis*

Mappe di luminanze secondo quanto indicato nel paragrafo 3.4 si sono effettuate delle mappe di luminanza con lo strumento videoluminanzometro descritto nel paragrafo 5.1.3.

Lo strumento è stato posizionato in diversi punti all'interno della cella di prova, in modo da verificare le diverse distribuzioni di luminanza al variare della distanza dalle superfici finestate. In tutti i casi, lo strumento è stato collocato con la lente ad un'altezza da terra pari a 1,2 m, in modo da farlo coincidere con la posizione degli occhi di un utente seduto ad una scrivania, nelle diverse posizioni dell'ambiente, e verificare la distribuzione di luminanza che percepirebbe da ciascuna posizione. La direzione di osservazione dello strumento è stata assunta perpendicolare rispetto alle finestre, al fine di inquadrare la superficie delle finestre e le aree circostanti.

Le misure sono state condotte in una giornata in condizioni di cielo sereno. Le due tecnologie di facciata trasparente analizzate si trovano montate sulla medesima test cell di prova. I valori di luminanza rilevati sulle superfici interne delle due tecnologie sono dunque influenzati da entrambe le tecnologie di facciata. Effettuando la misura nella stessa cellula non è possibile fare un confronto diretto tra i valori di luminanza rilevati in ambiente. Per questo motivo durante il secondo set di misure si è scelto di oscurare una tecnologia con un panno nero in modo da misurare in ambiente il contributo di una tecnologia alla volta.

Capitolo 7

Modello orario, semplificato per l'analisi energetica di sistemi di facciata trasparenti attivi

Lo sviluppo di modelli per la valutazione della prestazione energetica di sistemi di facciata trasparenti attivi è un tema oggetto di discussione e di ricerca. Nel capitolo si presenta un nuovo modello di calcolo orario e semplificato proposto per la valutazione energetica di sistemi di FTA in fase preliminare di progetto. Il modello *MATS* Modelling Active Transparent Systems, ha una struttura a parametri concentrati che permette di analizzare in condizioni stazionarie sistemi di FTA con ventilazione meccanica, inserendo come dati di input, valori comunemente reperibili nelle schede tecniche. Lo strumento di calcolo è stato pensato per le fasi preliminari della progettazione.

Il modello è stato calibrato e validato con i dati sperimentali provenienti da due campagne sperimentali diverse di FTA (CSa e CSc).

La definizione delle equazioni del modello di calcolo è avvenuta dal lavoro congiunto di diversi membri del gruppo di ricerca, l'autore del lavoro, Y. Cascone, A. Gorrino, V. Corrado e V. Serra, l'implementazione modellistica è a cura di Y. Cascone. La descrizione del modello e i primi risultati sono stati presentati nell'articolo "*A simplified hourly model for energy characterisation of transparent active façades. A comparison between simulation results and monitored data* " Bianco et al. [23].

7.1 Descrizione del modello

Nel nuovo strumento di calcolo si è scelto di adottare l'approccio di simulazione più semplificato, per sviluppare uno strumento di modellazione veloce e utile nella fase preliminare del progetto. Il nuovo modello semplificato è a parametri concentrati, la facciata viene modellata come un unico livello e ogni strato che compone la facciata simulata è assunto come un nodo a cui è associata una sola temperatura. Dall'analisi bibliografica nel paragrafo 4.2.1 è emerso che i mo-

delli a parametri concentrati se opportunamente calibrati con dati sperimentali possono restituire buoni risultati. E' evidente che la prima fonte di errore, nell'utilizzo di questi modelli, deriva dal fatto che non è possibile simulare gli effetti di stratificazione dell'aria in intercapedine e conseguentemente le differenze di temperatura e di flussi termici ai diversi livelli della facciata, perché si assume che la facciata sia uguale ad un unico livello composto da diversi nodi.

Il nuovo modello parte da un lavoro precedente affrontato nel gruppo di ricerca, che aveva visto lo sviluppo di uno strumento di calcolo chiamato NEW VET pubblicato nel 1999 da V. Corrado e V. Serra, in linguaggio FORTRAN, per la valutazione energetica di un sistema finestra complesso composto da vetri e schermature continue. Il nuovo strumento di calcolo parte dal programma NEW VET che a sua volta si basava su WINSOL del CSTB. Le principali modifiche che erano state apportate a NEW VET rispetto al modello francese riguardano la risoluzione del bilancio energetico a bassa lunghezza d'onda, dove la radiazione solare incidente è stata differenziata nelle due componenti diretta e diffusa. La radiazione diretta trasmessa o riflessa da ciascun componente è stata inoltre disaggregata nelle due componenti direzionale ed emisferica e il software calcola i parametri ottico e solari in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare sul sistema.

Partendo dal lavoro di NEW VET si è implementato il nuovo strumento di calcolo studiato per la simulazione di sistemi di facciata trasparenti con ventilazione nell'intercapedine meccanica, la modalità ventilazione naturale non è stata ancora implementata.

I sistemi di facciata trasparenti sono modellati come nodi di un analogo elettrico. E' possibile simulare FTA con schermatura in intercapedine e/o interne e esterne, intercapedini ventilate meccanicamente o non ventilate.

La prima fase prevede la schematizzazione del sistema da testare secondo l'analogo elettrico. Una volta definiti i nodi di simulazione attraverso la soluzione delle equazioni di bilancio dei nodi, sono calcolate le temperature di ogni nodo e conseguentemente è possibile calcolare i coefficienti di scambio termico e i flussi termici per ogni nodo. Gli output del modello forniscono i valori dei parametri solari e ottici in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare.

In tabella sono rappresentati i principali input e output del modello (tabelle 7.1, 7.2).

Le condizioni al contorno di temperatura dell'aria esterna, interna e radiazione solare devono essere imputati con un profilo orario.

I passaggi di calcolo del modello sono:

1. la radiazione solare globale incidente sul piano orizzontale viene scomposta nella quota di radiazione solare diretta e diffusa,
2. calcolo della radiazione solare assorbita da ogni nodo $\dot{q}_I(n)$,
3. prima ipotesi delle temperature dei nodi,
4. calcolo dei coefficienti di scambio termico convettivi e radiativi tra i nodi $h(n)$,
5. calcolo della temperatura dei nodi e della quota radiativa e convettiva dei flussi termici scambiati tra i nodi t_n ,

Tabella 7.1: Parametri di input del modello. (* per angolo di incidenza normale al layer)

INPUT	simbolo	unità
Condizioni al contorno		
Temperatura dell'aria esterna	t_{out}	[°C]
Temperatura dell'aria interna	t_{in}	[°C]
Irradianza globale sul piano orizzontale	I_h	[W/m ²]
Coefficiente di scambio termico liminare esterno	h_e	[W/m ² K]
Coefficiente di scambio termico liminare interno	h_i	[W/m ² K]
Coordinate geografiche per identificare la località		
Caratteristiche geometriche		
Altezza del sistema	H	[m]
Larghezza del sistema	L	[m]
Distanza tra i nodi del sistema	EC_{1n}	[m]
Spessore dei nodi	d	[m]
Spessore intercapedini	EE	[m]
Caratteristiche fisico tecniche		
Coefficiente di trasmissione solare di ogni strato *	τ_s	[-]
Coefficiente di riflessione solare di ogni strato *	ρ_s	[-]
Emissività delle due facce di ogni strato	ε_i e ε_e	[-]
Portata d'aria di ventilazione	\dot{m}	[kg/s]
Tipologia del gas in intercapedine		

6. iterazione dei punti 4 e 5, finché la temperatura calcolata non differisce da quella dell'iterazione precedente di meno di 10^{-5} ,
7. calcolo delle proprietà solari e termiche del sistema.

Le assunzioni del modello sono che:

- il modello è stazionario, si ipotizza che il flusso termico sia monodimensionale e ortogonale al sistema vetrato,
- la capacità termica del vetro e delle schermature sono state considerate trascurabili,
- la conduzione termica tra le lastre di vetro non è stata considerata, perché si è assunta una sola temperatura per nodo,
- le proprietà ottiche degli strati vetrati (ρ , τ , α) dipendono dall'angolo di inclinazione della radiazione solare ma non dalla sua lunghezza d'onda né dalla polarizzazione,
- si ipotizza che la temperatura dell'aria in ingresso in intercapedine sia uguale a quella dell'aria interna ($t_{inlet} = t_{in}$),
- il nodo rappresenta l'intera lastra o schermo modellato, i layers non sono discretizzati in elementi più piccoli,

Tabella 7.2: Parametri di output del modello.

OUTPUT	simbolo	unità
Parametri termici		
Temperatura di ogni nodo simulato	t_n	[°C]
Temperatura dell'aria nelle intercapedini	t_{cav}	[°C]
Coefficiente di scambio termico convettivo per ogni nodo	h_c	[W/m ² K]
Coefficiente di scambio termico radiativo per ogni nodo	h_r	[W/m ² K]
Flusso termico che attraversa globalmente il sistema	\dot{q}	[W/m ²]
Coefficiente di trasmissione solare per angolo di incidenza	τ_s	[-]
Coefficiente di riflessione solare per angolo di incidenza	ρ_s	[-]

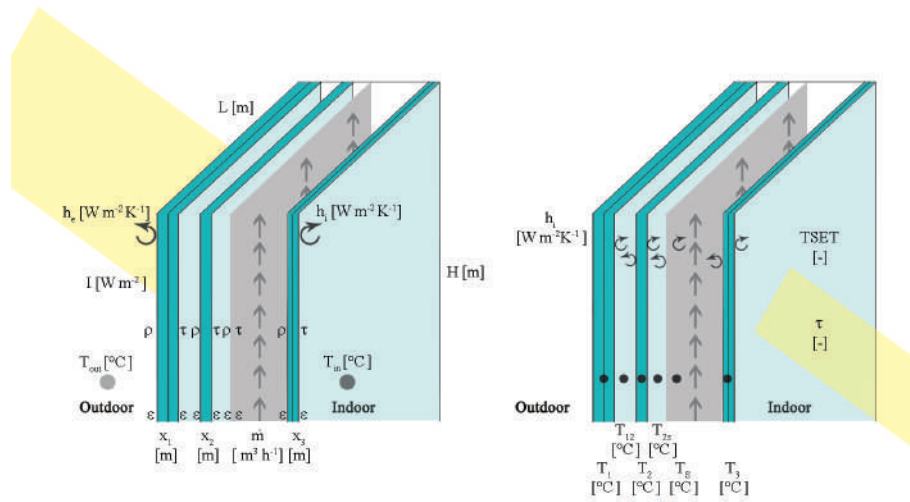


Figura 7.1: Schema di INPUT e OUTPUT del modello di calcolo.

- i vetri stratificati si assumono come monolitici.

Ogni nodo del sistema è rappresentato da una resistenza elettrica che equivale alla resistenza termica del nodo.

Il modello è stato scritto in linguaggio Matlab (R2011a).

7.2 Le equazioni di bilancio termico

Nello schema in figura 7.2 si riporta l'analogo di una delle FTA simulata con il modello semplificato. Il sistema simulato presenta un vetrocamera esterno, un'intercapedine ventilata e un vetro stratificato interno. Il sistema è stato modellato come 4 nodi (1,2,4 per i vetri e 3 per lo schermo). Le intercapedini sono state caratterizzate come il nodo 12 (intercapedine sigillata) e il nodo 23 e 34, come le intercapedini ventilate. La temperatura dell'aria in intercapedine è stata calcolata come un valore medio e unico.

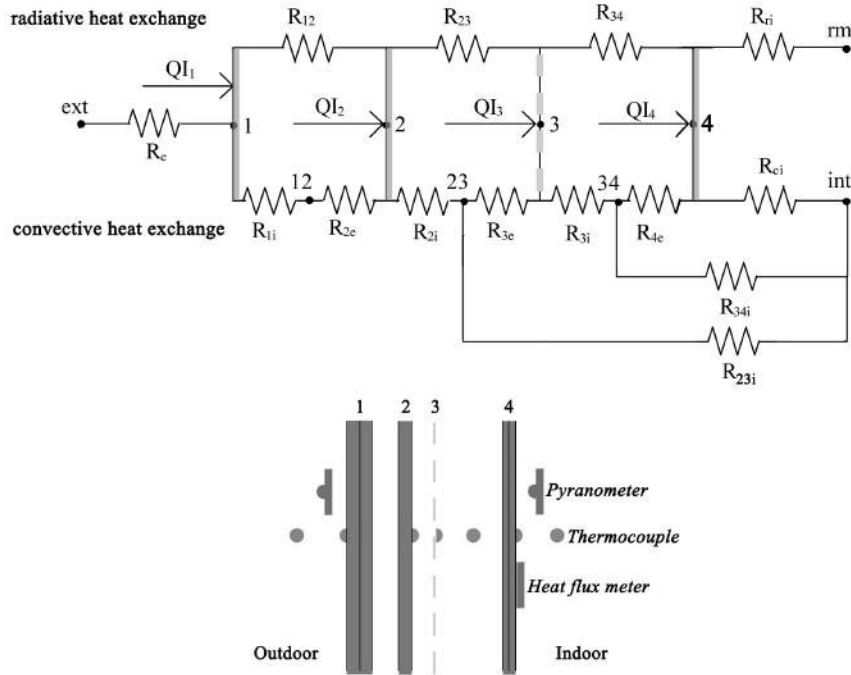


Figura 7.2: Schema di equivalente elettrico di una FTA, a destra i layers della FTA.

7.2.1 Lo scambio termico short-wave

La **radiazione solare** incidente sull'elemento di facciata simulato è stata divisa nella quota diretta, diffusa e riflessa¹:

$$I = I_b + I_d + I_r \quad (7.1)$$

Le equazioni implementate nel modello di simulazione permettono di calcolare partendo dalla radiazione solare globale sul piano orizzontale (I_{th}) e da quella totale incidente sulla facciata ($I_{t\theta}$), i valori di:

- I_{bh} , l'irradianza diretta sull'orizzontale
- I_{dh} , l'irradianza diffusa sull'orizzontale
- $I_{b\theta}$, l'irradianza diretta per l'esposizione della facciata della FTA
- $I_{d\theta}$, l'irradianza diffusa per l'esposizione della facciata della FTA

¹pedici e angoli utilizzati nel paragrafo per la radiazione solare (I):

b , diretta,

d , diffusa,

r , riflessa,

h , orizzontale,

θ , angolo di incidenza per l'esposizione della FTA

z angolo zenitale

Σ angolo di inclinazione della parete (90° se verticale)

In appendice 11.2 si sono riportate le equazioni per determinare la posizione del sole, calcolare gli angoli θ e z , rispettivamente l'angolo di incidenza della radiazione solare per l'esposizione considerata e l'angolo zenitale. Per il calcolo della radiazione diffusa si è utilizzato un modello di cielo isotropo, che considera la volta celeste come una fonte di radiazione solare perfettamente diffusa e uniforme. Seguendo le equazioni di *Duffie et al.* [42],[30],[31], si è scritto il sistema di equazioni che è stato risolto dal modello per via matriciale come:

$$I_{bh} + I_{dh} = I_{th} \quad (7.2)$$

$$I_{b\theta} + I_{d\theta} = I_{t\theta} \quad (7.3)$$

$$I_{b\theta} = I_{bh} \cdot \frac{\cos\theta}{\cos z} \quad (7.4)$$

$$I_{d\theta} = I_{dh} \cdot \frac{1 + \cos\Sigma}{2} + I_{r\theta} \quad (7.5)$$

dove si ipotizza di includere nella quota diffusa $I_{d\theta}$ la radiazione solare riflessa dal terreno per quell'esposizione $I_{r\theta}$ definita come :

$$I_{r\theta} = I_{th} \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos\Sigma}{2} \quad (7.6)$$

Con ρ si indica l'albedo del terreno che è stato assunto pari a 0,20, valore generalmente accettato [30].

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -\frac{\cos\theta}{\cos z} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1 + \cos\Sigma}{2} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} I_{th} \\ I_{t\theta} \\ 0 \\ I_{th} \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos\Sigma}{2} \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

$$X = \begin{bmatrix} I_{bh} \\ I_{dh} \\ I_{b\theta} \\ I_{d\theta} \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

dove:

$$A \cdot X = B \longrightarrow X = A^{-1} \cdot B \quad (7.9)$$

Le proprietà solari delle lastre vetrate sono state determinate in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare (θ) e per ogni lato della lastra di vetro analizzata i ed e (interno ed esterno). I coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione oltre che dipendere dall'angolo della radiazione solare sono funzione del mezzo in cui si propagano. Rispetto alle tecniche di simulazione *ray-tracing* che permettono di determinare i coefficienti considerando le riflessioni multiple nelle lastre per valutare le proprietà di lastre stratificate e/o con rivestimenti (coating basso emissivi, riflettenti, etc.) [18], nel modello si è utilizzato un approccio semplificato che segue la metodologia applicata nel modello NEW VET [36] e si è assunto che:

- la radiazione solare diretta incidente sul componente è trasmessa e riflessa, come radiazione a bassa lunghezza d'onda, in parte in modo diretto e in parte in modo diffuso,
- la radiazione solare diffusa incidente sul componente viene trasmessa e riflessa in modo diffuso e uniforme.

Le proprietà solari angolari delle lastre di vetro sono state distinte tra:

- proprietà angolari per la radiazione solare diretta, $\tau_{s,\theta\theta}$ e $\rho_{s,\theta\theta}$,
- proprietà angolari per la radiazione solare diretta trasmessa e riflessa in modo diffuso (quota emisferica), $\tau_{s,\theta h}$ e $\rho_{s,\theta h}$,
- proprietà angolari per la radiazione solare diffusa, $\tau_{s,d}$ e $\rho_{s,d}$.

Le proprietà angolari per radiazione solare diretta sono funzione esclusivamente dell'angolo di incidenza della radiazione solare e valgono le relazioni:

$$\tau_{s,\theta} = \tau_{s,\theta\theta} + \tau_{s,\theta h} \quad (7.10)$$

$$\rho_{s,\theta} = \rho_{s,\theta\theta} + \rho_{s,\theta h} \quad (7.11)$$

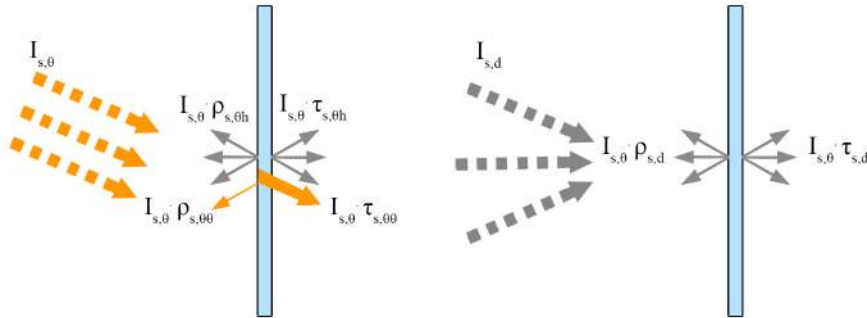


Figura 7.3: Comportamento del componente trasparente alla radiazione solare diretta a sinistra e diffusa a destra.

Calcolo delle proprietà solari angolari delle lastre vetrate. Le proprietà angolari dei vetri sono state calcolate con l'equazione di Furler (1991) [43]. Il metodo applicato nel nuovo modello differisce da quello di NEW VET dove le proprietà angolari venivano calcolate con i coefficienti t e r per le diverse tipologie di vetri secondo il metodo ASHRAE [37].

L'ipotesi alla base del metodo di Furler è di applicare il modello solo a vetri omogenei (privi di rivestimento) altrimenti le riflessioni multiple nel layer di rivestimento influiscono sull'esattezza del risultato. Il modello sviluppato utilizza le equazioni di Furler anche per i vetri non omogenei che presentano un rivestimento. Si analizzerà nel capitolo 10 se questa approssimazione è fonte di errore nella simulazione.

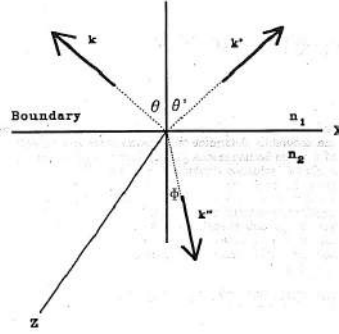


Figura 7.4: Angolo di incidenza, riflessione e trasmissione all'interfaccia di due mezzi con indice di rifrazione n_1 e n_2 da figura 1 di [43].

I coefficienti di riflessione e trasmissioni sono legati alla riflessività e trasmissività dalle seguenti equazioni:

$$T_\lambda(\theta) = \frac{\tau_\lambda(\theta)^2 \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos\theta}}{1 - \rho_\lambda(\theta)^2 \cdot e^{-2\alpha_\lambda \cdot d / \cos\theta}} \quad (7.12)$$

$$R_\lambda(\theta) = \rho_\lambda(\theta) \cdot (1 + T_\lambda(\theta) \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos\theta}) \quad (7.13)$$

dove con d si indica lo spessore della lastra in m , con λ è la lunghezza d'onda a cui si effettua il calcolo in nm e con θ l'angolo di incidenza della radiazione solare.

Il coefficiente di assorbimento α è così definito:

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot k}{\lambda} \quad (7.14)$$

dove con k si indica l'indice di estinzione adimensionale funzione della lunghezza d'onda.

La riflessività spettrale è calcolata utilizzando l'equazione di Fresnell assumendo la radiazione solare incidente non polarizzata come:

$$\rho_\lambda(\theta) = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\sin(\theta - \phi)}{\sin(\theta + \phi)} \right)^2 + \left(\frac{\tan(\theta - \phi)}{\tan(\theta + \phi)} \right)^2 \right) \quad (7.15)$$

Secondo la legge di Snell:

$$\sin\theta = n \cdot \sin\phi \quad (7.16)$$

dove con θ si indica l'angolo di incidenza e con ϕ l'angolo con cui viene trasmessa la radiazione solare da un mezzo con indice di rifrazione n_1 a n_2 .

L'equazione 7.15 per l'angolo di incidenza θ normale è:

$$\rho_\lambda(\theta) = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \quad (7.17)$$

Mentre la trasmissività è definita come:

$$\tau_\lambda(\theta) = 1 - \rho_\lambda(\theta) \quad (7.18)$$

Per la risoluzione matematica del problema si sono seguiti i passaggi indicati nel metodo di Furler [43] che prevede il calcolo:

- dell'indice di rifrazione n con l'equazione 7.17,
- dell'indice di estinzione k con l'equazione 7.13 della riflessività ipotizzando incidenza normale,
- della riflettività con l'equazione 7.15,
- della trasmissività con l'equazione 7.18,
- dei coefficienti in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare sostituendo i coefficienti di trasmissività e riflessività nelle equazioni rispettivamente, 7.12 e 7.13.

Nel modello non si sono effettuati calcoli spettrali, per diverse lunghezze d'onda, ma si è utilizzato il valore centrale di lunghezza d'onda pari a 898 nm, in quanto Furler dimostra nel suo articolo [43] che l'errore nel calcolare l'indice di estinzione è contenuto se si utilizzano i valori centrali dello spettro della radiazione solare o del visibile.

Per determinare le proprietà solari diffuse delle lastre vetrate si è partiti dalle proprietà per radiazione solare diretta e si sono calcolati secondo le equazioni [36]:

$$\tau_{s,\theta d} = \int_0^{\pi/2} \tau_{s,\theta} \cdot 2 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta), d\theta \quad (7.19)$$

$$\rho_{s,\theta d} = \int_0^{\pi/2} \rho_{s,\theta} \cdot 2 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta), d\theta \quad (7.20)$$

Le caratteristiche solari delle schermature La radiazione solare viene assorbita, riflessa e trasmessa dalle schermature. Seguendo le indicazioni della norma ISO 15099 le proprietà tridimensionali delle schermature sono state ricondotte alla condizione di mono-dimensionalità per poter assimilare ad un nodo il layer. Le equazioni implementate nel modello sono per la simulazione di tende a rullo. Non si sono ancora implementate altre tipologie di schermature e la validazione del modello è stata effettuata con dati sperimentali di FTA con tende a rullo. Per i componenti schermanti continui ed omogenei (tende) si è seguito lo stesso approccio utilizzato per le lastre di vetro, la radiazione solare è stata divisa nella quota diretta e diffusa e si sono calcolati i coefficienti di trasmissione e riflessione partendo dai valori ad angolo di incidenza normale.

Per la quota di radiazione solare diretta [36]:

$$\tau_{s,\theta} = \tau_{s,\theta}(0) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta}{90}\right)^2} \quad (7.21)$$

$$\rho_{s,\theta} = 1 - [1 - \rho_{s,\theta}(0)] \sqrt{1 - \left(\frac{\theta}{90}\right)^2} \quad (7.22)$$

Per la radiazione diffusa [36]:

$$\tau_{s,d} = 0,82445 \cdot \tau_{s,\theta}(0) \quad (7.23)$$

$$\rho_{s,d} = 1 - 0,82445 \cdot (1 - \rho_{s,\theta}(0)) \quad (7.24)$$

Calcolo dei flussi di energia assorbiti dai nodi La risoluzione del bilancio energetico di radiazione a bassa lunghezza d'onda permette di determinare la quota di flusso termico assorbita da ogni nodo del sistema (\dot{q}_I). Si è applicata la metodologia di calcolo del modello NEW VET [36] che considera infinite riflessioni multiple tra ciascuna coppia di elementi adiacenti. Il primo passo del modello prevede il calcolo dei parametri equivalenti direzionali, calcolati con la quota di radiazione solare trasmessa e quella trasmessa dalla radiazione riflessa per ogni lastra (n) del sistema e per ogni lato (i ed e) per:

- radiazione diretta ($\tau_{e,eq,\theta\theta}(n), \tau_{i,eq,\theta\theta}(n), \rho_{e,eq,\theta\theta}(n), \rho_{i,eq,\theta\theta}(n)$),
- radiazione diffusa ($\tau_{e,eq,d}(n), \tau_{i,eq,d}(n), \rho_{e,eq,d}(n), \rho_{i,eq,d}(n)$),
- radiazione diretta parametri emisferici ($\tau_{e,eq,\theta h}(n), \tau_{i,eq,\theta h}(n), \rho_{e,eq,\theta h}(n), \rho_{i,eq,\theta h}(n)$).

La quota di radiazione a bassa lunghezza d'onda assorbita dai nodi della facciata è definita come:

$$\dot{q}_I(n) = L_{i(n-1)} - L_{i(n)} + L_{e(n+1)} - L_{e(n)} \quad (7.25)$$

dove $L_{i(n-1)}$ per il nodo verso l'esterno (lastra di vetro o tenda verso esterno) è uguale alla radiazione solare incidente sulla facciata e quindi l'equazione 7.25 diventa:

$$\dot{q}_I(n) = I_b + I_d - L_{i(n)} + L_{e(n+1)} - L_{e(n)} \quad (7.26)$$

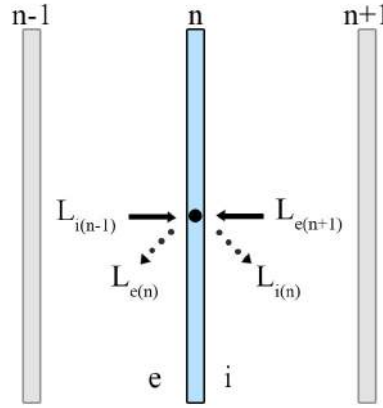


Figura 7.5: Bilancio short-wave sul nodo.

Con $L_{(n)}$, i o e , interno o esterno, si sono indicati la quota di radiazione solare che arriva sul nodo dall'esterno e dall'interno, comprensivo della quota di radiazione solare diretta e diffusa.

$$L_{i(n)} = L_{i,\theta} + L_{i,d} \quad (7.27)$$

$$L_{e(n)} = L_{e,\theta} + L_{e,d} \quad (7.28)$$

I flussi che arrivano sul nodo sono bilanciati dai flussi short-wave che escono che sono stati calcolati considerando la radiazione trasmessa e riflessa da ogni nodo. Per la radiazione solare diretta $L_{(n)}$ si calcolano secondo:

$$L_{i,\theta,(n)} = I_b \cdot (\tau_{i,eq,\theta\theta}(n) + \rho_{i,eq,\theta\theta}(n)) \quad (7.29)$$

$$L_{e,\theta,(n)} = I_b \cdot (\tau_{i,eq,\theta\theta}(n) + \rho_{e,eq,\theta\theta}(n)) \quad (7.30)$$

Per la radiazione solare diffusa, da radiazione solare diffusa e da diretta trasmessa in modo diffuso $L_{(n)}$ si calcolano secondo:

$$L_{i,d,(n)} = I_d \cdot (\tau_{e,eq,d}(n) + \rho_{i,eq,d}(n)) + I_b \cdot (\tau_{eq,\theta h}(n) + \rho_{i,eq,\theta h}(n)) \quad (7.31)$$

$$L_{e,d,(n)} = I_d \cdot (\rho_{e,eq,d}(n) + \tau_{i,eq,d}(n)) + I_b \cdot (\tau_{i,eq,\theta h}(n) + \rho_{e,eq,\theta h}(n)) \quad (7.32)$$

I coefficienti di trasmissione e riflessioni equivalenti sono calcolati risolvendo la matrice in figura.

Ipotesi semplificative Nella risoluzione delle equazioni di bilancio short-wave si sono adottate alcune ipotesi esemplificative:

- la radiazione diretta incidente sul componente trasparente è trasmessa e riflessa in modo direzionale ($\tau_{e,\theta h} = \tau_{i,\theta h} = \rho_{e,\theta h} = \rho_{i,\theta h} = 0$),
- tutta la radiazione diretta incidente sul componente schermante è trasmessa e riflessa in modo uniformemente diffuso ($\tau_{e,\theta\theta} = \tau_{i,\theta\theta} = \rho_{e,\theta\theta} = \rho_{i,\theta\theta} = 0$),
- i coefficienti di riflessione direzionale, emisferica e diffusa dell'ambiente interno sono stati assunti pari a zero.

7.2.2 Lo scambio termico long-wave

Lo scambio termico ad alta lunghezza d'onda si è diviso nell'analisi dello scambio termico per irraggiamento e convettivo.

Lo scambio termico per **irraggiamento** è stato calcolato:

- tra le facce che compongono la FTA,
- tra la superficie interna della FTA e le superfici dell'ambiente interno,
- tra la superficie esterna della FTA e le superfici dell'ambiente esterno.

Per il calcolo dello scambio termico per irraggiamento tra le lastre di vetro o tra lastra e tenda si è utilizzato un fattore di vista relativa ai due corpi 1 e 2, uguale ad 1 ($F_{12}=1$), ipotizzando di trovarsi nella condizione di lastre piane infinite e parallele.

Si è ipotizzato che le superfici che compongono la FTA siano grigie e quindi che l'emissività sia costante e non funzione della lunghezza d'onda e della direzione.

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \varepsilon \quad (7.33)$$

Con il simbolo T si indicano i valori di temperatura assoluta in Kelvin.

Con sigma σ si indica la costante di Stefan Boltzman pari a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

	A																B			
TN																				
T_{c1}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T_{c1}		
0	$-T_{c2}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	$-T_{c3}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	$-T_{c4}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P_{c1}		
$-P_{c2}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	$-P_{c3}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	$-P_{c4}$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	$-T_{l1}$	0	0	1	$-T_{l1}$	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	$-T_{l2}$	0	0	1	$-T_{l2}$	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	$-T_{l3}$	0	0	1	$-T_{l3}$	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	$-T_{l4}P_{c5}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	$-T_{l4}P_{c5}$	0	0		
0	0	0	0	0	0	$-P_{l1}$	0	0	0	$-P_{l1}$	0	0	1	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	$-P_{l2}$	0	0	0	$-P_{l2}$	0	0	1	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	$-P_{l3}$	0	0	0	$-P_{l3}$	0	0	1	0	0	0		
0	0	0	0	$-P_{l4}P_{c5}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$1 - P_{l4}P_{c5}$	0	0		

Figura 7.6: Matrice per determinare i coefficienti di trasmissione e riflessione dei diversi nodi secondo l'equazione 7.9.

Lo scambio termico per **convezione** è stato calcolato:

- tra la faccia esterna della FTA e l'aria esterna,
- tra la lastra o la tenda e il gas in intercapedine,
- tra la faccia interna della FTA e l'aria interna.

Scambio termico radiativo tra i nodi del sistema Il flusso termico radiativo tra due superfici parallele (ad esempio strato 1 e 2) risulta essere uguale a:

$$\dot{q}_{r12} = \sigma \cdot F_\varepsilon \cdot F_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (7.34)$$

E quindi:

$$\dot{q}_{r12} = \sigma \cdot F_\varepsilon \cdot F_{12} \cdot (T_1^2 - T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1 - T_2) \quad (7.35)$$

Il coefficiente di scambio termico radiativo è uguale a:

$$h_{r12} = \sigma \cdot F_\varepsilon \cdot F_{12} \cdot (T_1^2 - T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \quad (7.36)$$

Il flusso termico scambiato per irraggiamento tra due superfici della FTA è calcolato senza nessuna linearizzazione come:

$$\dot{q}_{r12} = h_{r12} \cdot (T_1 - T_2) \quad (7.37)$$

Dove F_ε è stato calcolato per due lastre piane parallele assimilate a corpi grigi e con ε si sono indicate le emissività delle facce, come:

$$F_\varepsilon = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \quad (7.38)$$

Scambio termico radiativo con l'ambiente esterno è stato descritto tramite l'equazione 7.39 (da annex F di EN ISO 13791:2004):

$$\dot{q}_{re} = h_{re} \cdot (t_{out} - t_{se}) + \dot{q}_{sky} \quad (7.39)$$

Dove il coefficiente di scambio termico radiativo h_{re} è uguale a:

$$h_{re} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad (7.40)$$

Il termine T_m rappresenta la media aritmetica tra la temperatura dell'aria esterna T_{out} e quella della superficie esterna della FTA T_{se} in Kelvin.

Si è considerato l'extra flusso termico verso la volta celeste attraverso il calcolo di \dot{q}_{sky} :

$$\dot{q}_{sky} = F_{sky} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{sky}^4 - T_{out}^4) \quad (7.41)$$

Dove con F_{sky} si è indicato il fattore di vista tra la superficie esterna della FTA e la volta celeste e si è assunto pari a 0,33 secondo la tabella F.1 della norma EN ISO 13791:2004 per edificio in centro città. La temperatura del cielo (T_{sky}) è calcolata secondo la norma EN ISO 13791:2004 annex F come:

$$T_{sky} = [9,36 \cdot 10^{-6} \cdot T_{out}^6]^{0,25} \quad (7.42)$$

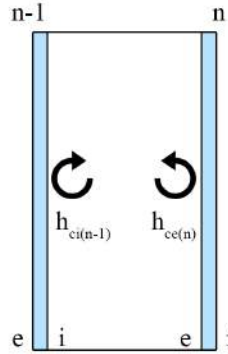


Figura 7.7: Scambio termico convettivo in intercapedine sigillata.

Scambio termico radiativo con l'ambiente interno La superficie interna della FTA scambia flusso termico radiativo con tutte le superfici dell'ambiente interno. Dalla norma ISO 10292 si è ricavata la formula per determinare il coefficiente di scambio termico radiativo verso l'ambiente interno così definito:

$$h_{r_i} = \frac{4,4 \cdot \varepsilon_i}{0,837} \quad (7.43)$$

Dove con ε_i si indica l'emissività media delle superfici dell'ambiente interno. Il flusso termico radiativo verso l'interno è quindi pari a:

$$\dot{q}_{r_i} = h_{r_i} \cdot (t_{si} - t_{in}) \quad (7.44)$$

Nel modello si è assunto che la temperatura superficiale delle superfici interne dell'ambiente fosse uguale a quella dell'aria interna (t_{in}).

Scambio termico convettivo nelle intercapedini è stato distinto tra:

- intercapedini sigillate,
- intercapedini ventilate.

Le intercapedini sigillate o chiuse sono le cavità dei vetrocamera/triplo vetrocamera. I moti convettivi sono di modesta entità, e gli scambi termici sono dovuti in gran parte alla conduzione - convezione nel gas e all'irraggiamento [95]. Il flusso termico convettivo è calcolato secondo:

$$\dot{q}_c = h_c \cdot (t_n - t_{n-1}) \quad (7.45)$$

Dove si assume come differenza di temperatura la temperatura superficiale delle due lastre di vetro che sigillano l'intercapedine e si suppongono a temperatura costante [95]. Il coefficiente di scambio termico convettivo è calcolato per il lato interno ed esterno di ogni lastra (i ed e) ed è uguale a:

$$h_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (7.46)$$

e quindi:

$$h_{ci(n-1)} = h_{ce(n)} = \frac{2 \cdot Nu \cdot \lambda}{d} \quad (7.47)$$

Dove:

$h_{ci(n-1)}$ è il coefficiente di scambio termico convettivo della lastra $n - 1$ lato interno $[W/(m^2K)]$,

$h_{ce(n)}$ è il coefficiente di scambio termico convettivo della lastra n lato esterno $[W/(m^2K)]$,

d è lo spessore in metri dell'intercapedine $[m]$,

λ è la conducibilità termica del gas nell'intercapedine $[W/(mK)]$ i cui valori sono ricavati dalle tabelle dell'Annex B di ISO 15099:2003,

Nu è il numero di Nusselt.

Il numero di Nusselt è funzione dell'inclinazione dell'intercapedine che è stata assunta verticale e del numero di Rayleigh, che a sua volta è funzione dei numeri di Prandtl e Grashof.

$$Nu = 0,035 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,38} = 0,035 \cdot (Ra)^{0,38} \quad (7.48)$$

Dove il numero di Rayleigh è dato dal prodotto del numero di Grashof (Gr) e Prandtl (Pr):

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (7.49)$$

Il numero di Grashof (Gr) è:

$$Gr = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho^2 \cdot \Delta t}{\mu^2} \quad (7.50)$$

Dove:

g è l'accelerazione di gravità pari a $9,81 [m/s^2]$,

d è lo spessore dell'intercapedine $[m]$,

ρ è la densità del gas $[kg/m^3]$,

μ è la viscosità dinamica del gas $[N \cdot s/m^2]$,

Δt è la differenza di temperatura delle pareti che delimitano l'aria in intercapedine .

Il numero di Prandtl (Pr) è:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \quad (7.51)$$

Dove c è il calore specifico del gas in $J/(kgK)$.

Le intercapedini ventilate sono state implementate nel modello solo per la tipologia con ventilazione meccanica, dove la portata d'aria immessa nell'intercapedine \dot{m} è nota. Lo scambio termico convettivo è definito secondo l'equazione 7.45 per ognuna delle due cavità. La portata d'aria che fluisce nelle due intercapedini (davanti alla tenda e dietro) è stata calcolata in proporzione allo spessore delle due cavità e quindi alla posizione della schermatura:

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (7.52)$$

$$\dot{m}_1 = \frac{d_1 \cdot \dot{m}}{d} \quad (7.53)$$

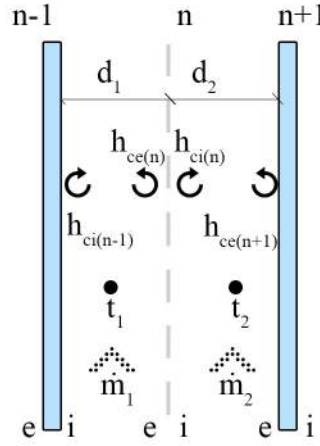


Figura 7.8: Scambio termico convettivo in intercapedine ventilata

$$\dot{m}_2 = \frac{d_2 \cdot \dot{m}}{d} \quad (7.54)$$

Dove si indica con:

\dot{m}_1 e \dot{m}_2 le portate d'aria nelle due intercapedini 1 e 2 $[kg/s]$,
 d_1 e d_2 lo spessore delle due intercapedini 1 e 2 $[m]$.

Le equazioni di bilancio delle due intercapedini ventilate sono:

$$c_p \cdot \dot{m}_1 \cdot (t_{outlet} - t_{inlet}) = h_{ci(n-1)} \cdot (t_{n-1} - t_1) + h_{ce(n)} \cdot (t_n - t_1) \quad (7.55)$$

$$c_p \cdot \dot{m}_2 \cdot (t_{outlet} - t_{inlet}) = h_{ci(n)} \cdot (t_n - t_2) + h_{ce(n+1)} \cdot (t_{n+1} - t_2) \quad (7.56)$$

Seguendo le indicazioni della norma ISO 15099 del 2003 le incognite che si sono calcolate sono :

- le temperature equivalenti dell'aria in intercapedine $t_{gap,j}$, rispettivamente per l'intercapedine 1 e 2 $t_{gap,1}$ e $t_{gap,2}$,
- la temperatura dell'aria in uscita dall'intercapedine t_{outlet} .

Le temperature dell'aria in intercapedine si sono determinate con:

$$t_{gap,j} = t_{mj} - \frac{\rho \cdot c \cdot b}{2 \cdot h_j} \cdot v \cdot \frac{1}{H} \cdot (t_{outlet} - t_{inlet}) \quad (7.57)$$

Dove:

ρ è la densità del gas $[kg/m^3]$,

c è il calore specifico del gas $[J/(kgK)]$,

b è la profondità dell'intercapedine $[m]$,

v è la velocità dell'aria calcolata secondo l'equazione 7.62,

h_j è il coefficiente di scambio termico convettivo calcolato secondo l'equazione 7.61,

H è l'altezza della facciata $[m]$,

t_{mj} sono le due temperature medie dei nodi t_{m1} e t_{m2} , così calcolate:

$$t_{m1} = \frac{t_{n-1} + t_n}{2} \quad (7.58)$$

$$t_{m2} = \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \quad (7.59)$$

La temperatura dell'aria in uscita dall'intercapedine è stata calcolata come:

$$t_{outlet} = t_{m12} - (t_{m12} - t_{inlet}) \cdot e^{\frac{H \cdot \rho \cdot c \cdot b}{2 \cdot h_c} \cdot v} \quad (7.60)$$

Si è assunto che i coefficienti di scambio termico convettivo fossero uguali tra loro e per il calcolo si è utilizzata la formula empirica valida per la convezione forzata:

$$h_{ci(n-1)} = h_{ce(n)} = h_{ci(n)} = h_{ci(n+1)} = 4 + 4 \cdot v \quad (7.61)$$

dove v è la velocità dell'aria in m/s nell'intercapedine determinata:

$$v = \frac{\dot{m}}{A_{sez}} \quad (7.62)$$

Ipotesi semplificative Per la validazione 1 si è assunto che la temperatura dell'aria in ingresso in intercapedine sia uguale a quella dell'aria interna ($t_{inlet} = t_{in}$). Non si è considerato che l'aria possa circolare da una parte all'altra dell'intercapedine passando attraverso i fori della tenda.

Scambio termico convettivo con l'ambiente esterno Si è calcolato il valore del coefficiente di scambio termico convettivo esterno come indicato nella norma EN ISO 13791:2004 (formula 13):

$$h_{ce} = 4 + 4 \cdot v \quad (7.63)$$

Dove v è la velocità in m/s dell'aria in prossimità della facciata analizzata. In mancanza di dati sperimentali o climatici della velocità del vento, si assume $v = 1 m/s$.

Scambio termico convettivo con l'ambiente interno si sono utilizzate le relazioni empiriche di Khalifa e Marshall [95]:

- per pareti verticali in una stanza con radiatori, pavimento radiante o ventilconvettori il cui flusso d'aria non sia rivolto verso la parete :

$$h_{ci} = 2,07 \cdot \Delta t^{0,23} \quad (7.64)$$

- pareti verticali in una stanza riscaldata con ventilconvettore il cui flusso d'aria sia rivolto verso la parete, oppure in una stanza con impianto di condizionamento e velocità dell'aria che lambisce la parete ignota:

$$h_{ci} = 2,92 \cdot \Delta t^{0,25} \quad (7.65)$$

- pareti verticali in una stanza con impianto di condizionamento, velocità dell'aria che lambisce la parete nota:

$$h_{ci} = 5,34 + 3,27 \cdot v \quad (7.66)$$

Dove con v si indica la velocità dell'aria che lambisce la parete in m/s e con Δt la differenza di temperatura tra la parete e l'aria in ambiente.

7.2.3 Le equazioni di bilancio sui nodi

Il numero di incognite che il modello calcolerà per le temperature dei nodi (t), il flusso termico convettivo lato interno della lastra (q_{ci}) e esterno (q_{ce}) e il flusso termico radiativo (q_r), sono funzioni dei nodi n della facciata:

- $t \rightarrow n$,
- $q_{ci} \rightarrow n$,
- $q_{ce} \rightarrow n$,
- $q_r \rightarrow n + 1$.

Il numero di equazioni è determinato come:

$$4n + 1 = \text{numero incognite} \quad (7.67)$$

dove n è il numero di nodi del sistema modellato.

Nell'immagine 7.10 è rappresentata la matrice di risoluzione delle equazioni implementate in Matlab per un sistema FTA con 4 nodi.

Le equazioni di *bilancio sui nodi* del sistema FTA implementate nel modello sono le prime quattro righe della matrice in figura 7.10 e per un generico nodo n , posto verso l'esterno, l'equazione di equilibrio sul nodo n è:

$$\dot{q}_I(n) = -\dot{q}_{ce}(n) + \dot{q}_{ci}(n) - \dot{q}_r(e) + \dot{q}_r(n) \quad (7.68)$$

Le equazioni di *bilancio per lo scambio termico per irraggiamento* sono implementate dalla riga 5 alle 10, della matrice e per un generico nodo n è uguale a:

$$\dot{q}_r(n) = h_r(n) \cdot (t_{n-1} - t_n) \quad (7.69)$$

Le equazioni di *bilancio per lo scambio termico convettivo* sono implementate dalla riga 10 alla 17, della matrice. Dalla riga 13 alla 16, le equazioni riguardano i nodi 3 e 4, che nel caso di ventilazione in intercapedine devono essere sostituite dalle equazioni dalla 13 alla 16 con pedice b. L'equazione considera il coefficiente di scambio termico convettivo diviso 2 perché si considera il coefficiente

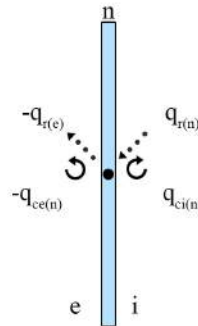


Figura 7.9: Bilancio sul nodo

di scambio termico convettivo sui due lati del nodo, e dunque per un generico nodo n l'equazione è uguale a:

$$\dot{q}_{ci}(n) = \frac{h_c(n)}{2} \cdot (t_n - t_{n+1}) \quad (7.70)$$

Nel caso di intercapedine ventilata:

$$t = \frac{H_o}{H} (1 - e^{-H/H_o}) \quad (7.71)$$

$$H_o = \frac{\rho \cdot c \cdot b}{2h_c} \quad (7.72)$$

		Equazioni di bilancio sui nodi				Equazioni dello scambio termico per irraggiamento				Equazioni dello scambio termico convettivo											
										intercapedine sigillata						intercapedine ventilata					
TN		$-\dot{q}_{i1}$	$-\dot{q}_{i2}$	$-\dot{q}_{i3}$	$-\dot{q}_{i4}$	$-h_{r1} \cdot t_{\text{ext}}$	0	0	0	$h_{r5} \cdot t_{\text{im}}$	$-h_{c1} \cdot t_{\text{ext}}$	0	0	0	0	0	$h_{c5} \cdot t_{\text{int}}$	$h_{c3} \cdot t_{\text{inlet}} \cdot t$	$-h_{c3} \cdot t_{\text{inlet}} \cdot t$	$h_{c4} \cdot t_{\text{inlet}} \cdot t$	$-h_{c4} \cdot t_{\text{inlet}} \cdot t$
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	$-h_{r1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	h_{r2}	$-h_{r2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	h_{r3}	$-h_{r3}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	h_{r4}	$-h_{r4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	$-h_{c1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	$h_{c2}/2$	$-h_{c2}/2$	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	$-h_{c2}/2$	$h_{c2}/2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13a	0	$h_{c3}/2$	$-h_{c3}/2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14a	0	$h_{c3}/2$	$-h_{c3}/2$	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15a	0	0	$h_{c4}/2$	$-h_{c4}/2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16a	0	0	$h_{c4}/2$	$-h_{c4}/2$	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	h_{c5}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13b	0	$h_{c3}/2 \cdot (1+t)$	$-h_{c3}/2 \cdot (1-t)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14b	0	$h_{c3}/2 \cdot (1-t)$	$-h_{c3}/2 \cdot (1+t)$	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15b	0	0	$h_{c4}/2 \cdot (1+t)$	$-h_{c4}/2 \cdot (1-t)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16b	0	0	$h_{c4}/2 \cdot (1-t)$	$-h_{c4}/2 \cdot (1+t)$	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

B

A

B

A

Figura 7.10: Matrice di equazioni implementate per la risoluzione delle equazioni dei nodi. Per t si veda equazione 7.71.

Capitolo 8

I casi studio

I casi studio di involucro trasparente analizzati nel lavoro di tesi si dividono in:

- componenti di involucro dinamici *CS1* e *CS2* (Caso Studio 1 e 2),
- sistemi di involucro attivi, facciate climatiche, *CSa*, *CSb*, *CSc* (Caso Studio a, b, c).

I Casi Studio (CS) presentati nel capitolo sono stati oggetto di monitoraggi in campo e i dati sperimentali raccolti sono stati elaborati e presentati nel capitolo 9. I componenti di involucro trasparenti (*CS1* e *CS2*) oltre che essere testati in campo, sono stati studiati dal punto di vista della progettazione e del concept, mentre i casi studio dei sistemi di facciata sono stati analizzati dal punto di vista della prestazione e non dello sviluppo progettuale del sistema. La maggior parte dei cinque casi studio *CS1*, *CS2* e *CSa*, sono stati testati nel sistema di celle di prova gemelle (TWINS) presente sulla copertura del dip. di Energia. Il *CSb* è l'unico caso studio di una facciata climatica che è stata oggetto di una campagna di misura in un edificio reale e in uso mentre le prestazioni del *CSc* sono state misurate in un mock up, in scala 1:1 di un modulo uffici, costruito nell'area del cantiere di Torre Regione Piemonte a Torino.

Solo il monitoraggio del caso studio *CSa* non è stato seguito durante l'attività di dottorato in quanto l'attività sperimentale era già conclusa. I risultati di questa attività sono stati analizzati per validare il modello orario presentato nel capitolo 7.



Figura 8.1: I Casi Studio.

Le TWINS Testing Window INnovative System (TWINS), sono due celle di prova gemelle posizionate sulla copertura del Politecnico di Torino, dip. Energia

Tabella 8.1: I Casi Studio (CS) di componenti e sistemi di facciata analizzati, luogo di raccolta dei dati sperimentale e tipologia di analisi dei dati. EDS=Elaborazione Dati Sperimentali, CVM=Calibrazione e Validazione del modello di simulazione semplificato sviluppato.

Codice	Descrizione	Luogo di prova			Analisi
Componenti					
CS1	Vetrocamera con PCM granulare	Test (Torino)	Cell	Polito	EDS
CS2	Triplovetrocamera con integrazione di materiale a cambiamento di fase e termotropico	Test (Torino)	Cell	Polito	EDS
Sistemi					
CSa	La facciata climatica Teleya	Test (Torino)	Cell	Polito	CVM
CSb	La facciata climatica Somec	Sede Vendemiano TV)	Somec	(S.	EDS
CSc	Le facciate climatiche Coopsette	Cantiere Torre Re-gione (Torino)			EDS + CVM

e sono state costruite per un progetto di monitoraggio su un sistema di facciate attive nel luglio del 2004 [66]. Il principale vantaggio di sperimentare tecnologie su celle di prova deriva dal fatto che le condizioni al contorno sono imposte, e non influenzate dall'utilizzo dell'edificio da parte degli utenti.

Le TWINS sono costituite da due moduli di prova identici, A e B, posizionati con esposizione a sud in modo da ricevere radiazione solare diretta senza ombreggiamento. Durante i monitoraggi sulla parete verso sud di una delle due celle viene montata la tecnologia da testare mentre sull'altra la tecnologia di riferimento. In questo modo è possibile caratterizzare la prestazione della tecnologia testata rispetto ad una soluzione tradizionale. Le dimensioni delle celle di prova sono state definite seguendo le indicazioni del modulo tipo ad uso ufficio dell'IEA task 27 - Solar Façade Components. Le celle presentano una pianta rettangolare delle dimensioni interne di 1,60 x 3,50 m e altezza di 3,04 m. L'involucro opaco è costituito da pannelli sandwich in doppia lamiera di acciaio con poliuretano espanso con trasmittanza termica di $0,43 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e spessore di 48 mm. Nella figura 8.2 è rappresentata la copertura del dipartimento con le celle di prova. La terza cella nell'immagine 8.2 con il verde in parete è una nuova cella di prova del gruppo di ricerca per la misura di moduli verticali verdi, tema di ricerca che non è stato affrontato nel lavoro di tesi (progetto Polight GReens). L'impianto delle celle A e B TWINS, è a tutt'aria con due UTA che permettono di immettere in ambiente aria alla temperatura di set-point desiderata. Le unità di trattamento aria installate sulle TWINS sono composte da:

1. ventilatore,
2. filtro,

3. batteria di raffreddamento,
4. batteria di riscaldamento/postriscaldamento.

La batteria di riscaldamento è una resistenza elettrica, la cui potenza è di 5 kW per ogni cella. La regolazione della temperatura all'interno della cella è gestita dal termoregolatore di cella. Il termoregolatore comanda l'accensione e lo spegnimento della resistenza elettrica, ma non ha alcuna influenza sull'accensione e lo spegnimento della macchina frigorifera. Per riuscire a mantenere una temperatura stabile all'interno delle celle, la resistenza elettrica post-riscalda successivamente al raffreddamento casuale della batteria di raffreddamento. L'attivazione della macchina frigorifera e la potenza di raffreddamento sono funzione della temperatura di mandata del fluido refrigerante (acqua e glicole) al quale l'aria cede calore all'interno della batteria di raffreddamento.



Figura 8.2: TWINS, cella A e B, in mezzo GReens cella di prova.

8.1 I componenti di involucro trasparente dinamici

8.1.1 I concepts del progetto Smartglass

I componenti di involucro trasparenti dinamici oggetto del lavoro di ricerca, sono stati sviluppati durante il progetto Polight Smartglass¹ attivo dal 2010 al

¹Partner del progetto: DENER Polito, MBT, Skyline.

SISTEMI (dall'esterno - all'esterno)	IMMAGINE	SISTEMI (dall'esterno all'interno)	IMMAGINE	BENCHMARK SISTEMI (dall'esterno - all'esterno)	IMMAGINE	BENCHMARK SISTEMI (dall'esterno - all'esterno)	IMMAGINE
1. Vetro Chiaro / PCM/ Granulare / Vetro Chiaro		2. Vetro Chiaro / Aria/ Vetro Chiaro / PCM/ Vetro Chiaro		A- Vetro chiaro/aria/ vetro chiaro		Vetro Chiaro/ Aria/ Vetro Chiaro/ Aria/ Vetro low-e	
3. Vetro con pellicola solare / PCM/ Vetro chiaro		4. Vetro con pellicola solare/ Aria/ Vetro chiaro/ PCM/ Vetro chiaro		B- Vetro chiaro/aria/ vetro chiaro			
5. Vetro Termotropico / PCM/ Vetro chiaro		6. Vetro Chiaro / Aereogel/ Vetro Chiaro / PCM/ Vetro Chiaro		C- Vetro chiaro/aria/ve low-e			
7. Vetro Chiaro / PCM/ Vetro Scaldante		8. Vetro Chiaro / PCM/ Vetro scaldante/ PCM/ V etro Chiaro		D- Vetro chiaro/PCM/ Vetro low-e			
9. Vetro elettrocromico / PCM/ Vetro chiaro		10. Vetro termotropico/ PCM/ Vetro chiaro/ Aria/ Vetro chiaro		E- Vetro chiaro/PCM/ vetro chiaro		IE: vetro low-e Q: vetro scaldante TE: vetro termotropico EC: vetro elettrocromico	

Figura 8.3: Studio dei concept dei componenti trasparenti.

2013. Lo scopo del progetto era di studiare un nuovo componente trasparente dinamico e innovativo in grado di migliorare le prestazioni energetiche dei componenti trasparenti. Il gruppo di ricerca ha sviluppato un primo prototipo costituito da un vetrocamera con materiale a cambiamento di fase a base paraffinico che è stato installato sul sistema sperimentale TWINS ed è stato testato sperimentalmente nel corso di diverse condizioni climatiche esterne. Il materiale a cambiamento di fase è stato posizionato all'interno dell'intercapedine di un vetrocamera chiaro + chiaro (8/15/6 mm) *DGU – PCM* ed è stato confrontato con un riferimento montato sulla medesima cella costituito da un vetrocamera *DGU*. Dall'analisi sperimentale del primo prototipo è emerso che [49], [48]:

- nel periodo estivo il *DGU – PCM* rispetto a un vetrocamera standard (*DGU*) è in grado di ridurre le energie entranti di un 1/5 rispetto al *DGU*, inoltre i flussi sono abbattuti e sfasati rispetto alla tecnologia *DGU*.
- Nel periodo invernale il *DGU – PCM* presenta prestazioni inferiori rispetto al componente *DGU*. Il materiale a cambiamento di fase abbatte i carichi solari entranti in ambiente e inoltre le dispersioni termiche attraverso il componente innovativo sono maggiori rispetto a quelle che si misurano sul componente tradizionale a causa del fatto che la conducibilità del materiale a cambiamento di fase è superiore dei gas in intercapedine.
- Dal punto di vista del comfort termico il materiale a cambiamento di fase porta ad un aumento delle temperature superficiali interne che può essere un elemento positivo nel periodo invernale o durante la mezza stagione mentre nel periodo estivo l'effetto è negativo e può essere causa di condizioni di discomfort.

Partendo dall'analisi dei risultati e dei punti deboli rilevati durante il monitoraggio del primo prototipo si sono sviluppati nuovi concept con lo scopo di ottimizzare la prestazione energetica, il comfort termico e luminoso attraverso l'integrazione di materiali e tecnologie innovative. Particolare attenzione è stata data alla limitazione delle dispersioni termiche nel periodo invernale e alla regolazione dei flussi solari. Le soluzioni proposte sono state studiate per:

- aumentare l'inerzia termica del sistema vetrato, regolare i flussi termici scambiati con l'ambiente esterno,
- garantire un elevato isolamento termico,
- controllare i flussi solari e luminosi.

Il principale scopo dell'integrazione di materiali a cambiamento di fase nei componenti trasparenti è di ridurre lo sfasamento tra gli apporti solari gratuiti e la domanda energetica. Il flusso di energia che incide sul componente viene immagazzinato dal materiale per cambiare la propria fase e viene trasmesso all'interno solo quando la fusione è completa. Inoltre alcune di queste tecnologie sono in grado di garantire la trasmissione della radiazione luminosa quando cambiano la loro fase.

In figura 8.3 sono rappresentate le diverse soluzioni progettate. Si sono indagati diversi possibili approcci tecnologici e i concept sono stati sviluppati per componenti con vetrocamera e triplo vetrocamera. Per ogni componente si è ipotizzato una tecnologia di riferimento con cui confrontare le prestazioni



Figura 8.4: Assemblaggio del prototipo vetrocamera con PCM granulare CS1, presso l'azienda MBT.

del componente innovativo. Sulla base di una serie di analisi preliminari, sono stati ideati, progettati, realizzati e testati due diversi prototipi di componenti vetrati responsivi. Il primo prototipo (CS1) con materiali a cambiamento di fase granulare e il secondo con materiale a cambiamento di fase accoppiato ad un layer termotropico (CS2). Per ogni componente studiato si è cercato di definire un componente che potesse essere il riferimento, in modo da confrontare le prestazioni con quelle di una soluzione tradizionale equivalente.

8.1.2 CS1-Vetrocamera con PCM granulare

Il prototipo del CS1 è stato realizzato integrando nell'intercapedine del vetrocamera (6/12/6 mm) materiale a cambiamento di fase shape stabilized e incapsulato (Dupont 18-24). Il PCM utilizzato è prodotto dalla Dupont e presenta una temperatura di fusione 23-25 °C. L'idea di utilizzare un materiale a cambiamento di fase microincapsulato deriva dalla volontà di evitare i fenomeni in cui la specchiatura presentava parte del materiale fuso e parte solido verificatasi con il primo prototipo. Inoltre l'aspetto della specchiatura con materiale a cambiamento di fase granulare è molto interessante anche dal punto di vista architettonico, infatti il materiale risulta essere traslucido. Il componente con il PCM granulare è stato testato su una delle celle TWINS ed è stato montato sulla test cell a febbraio 2012. L'acquisizione è iniziata a marzo 2012 ed è durata fino a giugno 2012. Il componente è stato assemblato nell'azienda MBT dove si è inserito all'interno del vetrocamera il materiale a cambiamento di fase granulare (vedi figura 8.4). Nella figura 8.5 è rappresentata la specchiatura con materiale a cambiamento di fase dopo essere stata montata sulla test cell. L'aspetto del prototipo CS1 è molto interessante anche dal punto di vista architettonico. Infatti l'integrazione del PCM nell'intercapedine del vetrocamera permette di ottenere un effetto traslucido come mostrato in figura 8.5. Purtroppo poco tempo dopo il montaggio del componente si sono verificati dei problemi sul materiale a cambiamento di fase, integrato nell'intercapedine della vetrata. Alcune capsule con il materiale a cambiamento di fase hanno perso il materiale contenuto al loro interno che si è depositato nella parte bassa della specchiatura figura 8.5. I granuli a cambiamento di fase si sono spostati dalla loro sede, creando delle fessurazioni. L'aspetto esteriore e il comportamento fisico tecnico del componente è risultato dunque compromesso.

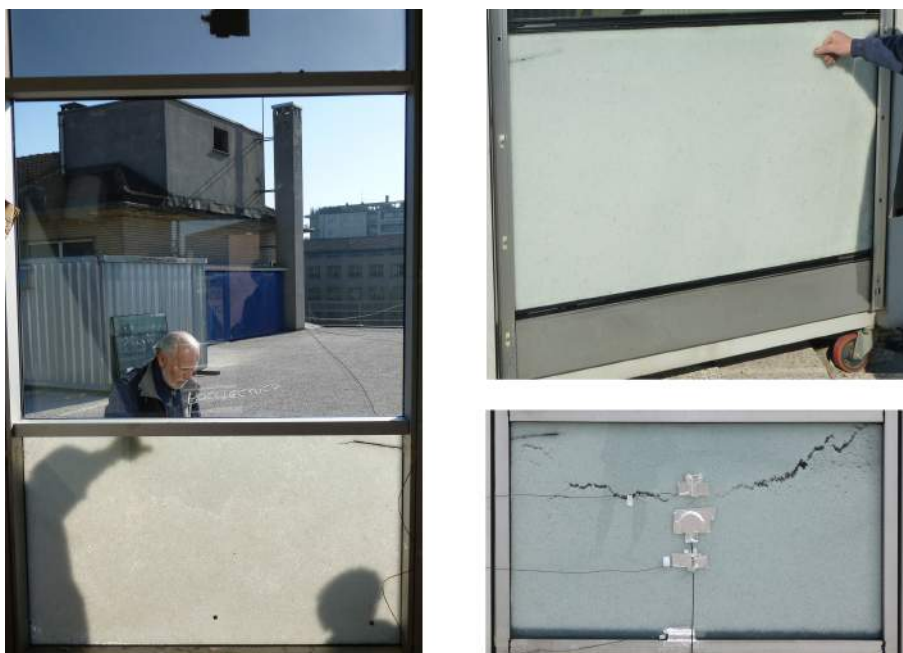


Figura 8.5: Il componente CS1 montato sulla test cell. A sinistra e sopra a destra subito dopo il montaggio, sotto dopo qualche mese.

CS1-II monitoraggio

SCOPO del monitoraggio e dell'elaborazione dei dati:
confrontare la prestazione energetica del CS1 con quella di un
vetrocamera tradizionale (vedi paragrafo 9.1).

Il componente è stato applicato ad una delle specchiature delle celle TWINS. Il comportamento del CS1 è stato confrontato con quello di un vetrocamera tradizionale tramite l'acquisizione di dati sperimentali in continuo con un time step di 15 minuti. Il monitoraggio ha investigato le prestazioni energetiche del componente tramite l'applicazione dei seguenti sensori collegati ad un acquisitore (vedi figura 8.6):

- 3 solarimetri (S), di cui 1 per rilevare la radiazione solare incidente sul piano verticale del componente, e gli altri due per rilevare la radiazione solare trasmessa dal componente innovativo e dal riferimento,
- 15 termocoppie (T) per rilevare temperature superficiali e dell'aria, interne ed esterne. Una termocoppia è stata inserita all'interno dell'intercapedine per misurare la temperatura del PCM,
- 2 termoflussimetri (HF) posizionati sul lato interno per rilevare il flusso termico superficiale attraverso il componente innovativo e tradizionale.

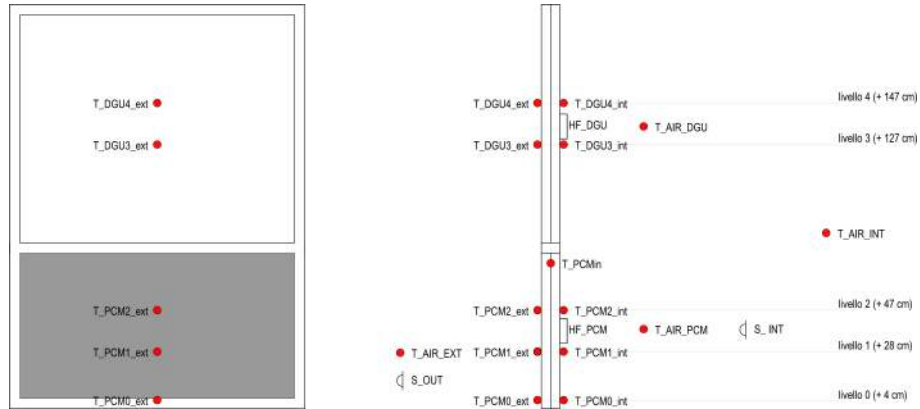


Figura 8.6: Schema dei sensori CS1.

8.1.3 CS2-Triplovetrocamera con integrazione di materiale a cambiamento di fase e termotropico

Il secondo prototipo *CS2* è stato sviluppato a partire dall'esperienza del primo ed è costituito da un triplo vetro con una doppia-camera, di cui una completamente riempita da PCM a base paraffinica RT35, mentre la seconda camera è riempita con gas inerte (Argon) e presenta rivestimenti bassoemissivi. Inoltre, uno dei due vetri del vetrocamera, quello che confina con l'ambiente esterno, contiene un layer termotropico innovativo. Il prototipo nasce dalla volontà di regolare il cambiamento di fase del materiale PCM durante la fusione e la solidificazione al fine di ottimizzare il funzionamento della tecnologia e di ridurre fenomeni di discomfort termico. Infatti il materiale a cambiamento di fase quando è completamente fuso può essere causa di condizioni di discomfort dovute al surriscaldamento della superficie del vetro, mentre quando il materiale si solidifica il flusso termico accumulato durante il giorno viene rilasciato causando apporti o dispersioni di calore.

L'integrazione del layer termotropico è stata studiata per regolare attivamente i flussi solari incidenti sul materiale a cambiamento di fase [44] e quindi regolarne la fusione. Il layer termotropico è in grado di ridurre la radiazione solare trasmessa al PCM grazie alla sua caratteristica di modificare le sue proprietà di trasmissione solare in funzione della sua temperatura superficiale. Il PCM impiegato nel prototipo è un materiale commerciale prodotto dalla Rubitherm RT35HC, che presenta una temperatura nominale di fusione di 35°C e un range tra i $33\text{-}37^{\circ}\text{C}$. La capacità termica del materiale varia in funzione dello stato; nel range di temperatura del cambiamento di fase è di 245 J/(gK) , mentre per le altre temperature è di 2 J/(gK) . La conducibilità termica del materiale è di circa $0,2 \text{ W/(mK)}$.

Il vetro termotropico integrato nel componente è un prodotto commerciale della Tilse (SOLARDIM eco) costituito da un vetro laminato da 9.5 mm (4+4 vetro chiaro) e layer polimerico. Il vetro termotropico (*TT*) attiva il cambiamento della fase del polimero quando raggiunge temperature superficiali comprese tra i 20 e i 40°C . In tabella 8.2 sono rappresentate le proprietà luminose e solari del vetro utilizzato durante la sperimentazione. Quando il vetro raggiunge la

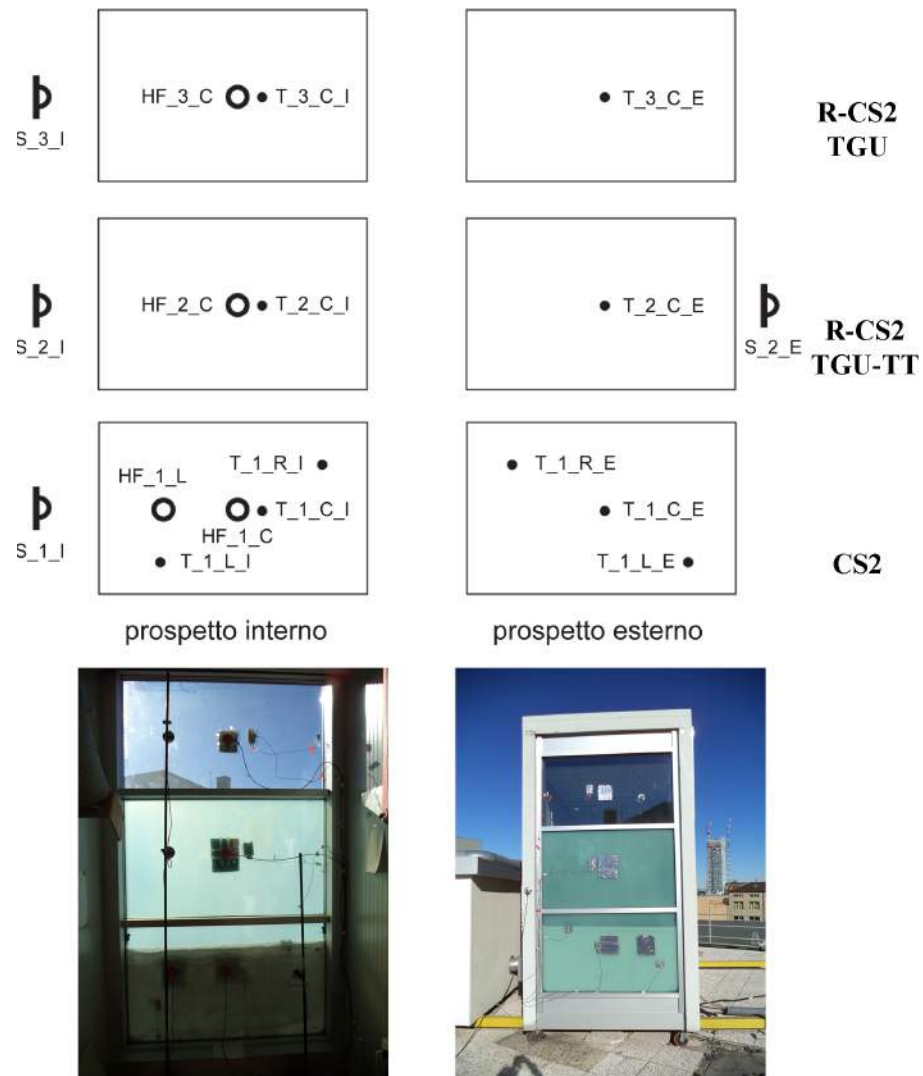


Figura 8.7: Schema dei sensori CS2.

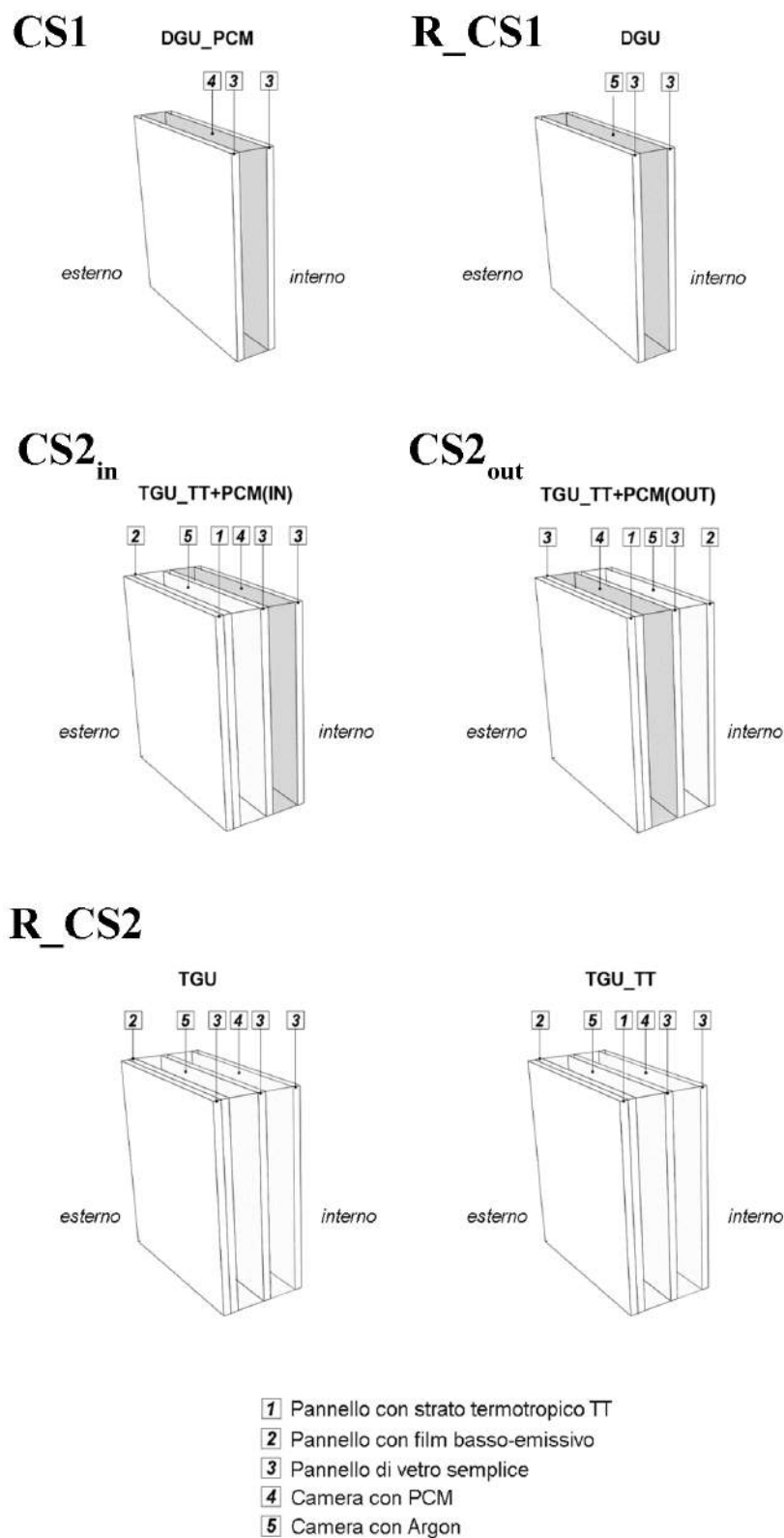


Figura 8.8: Componenti dinamici e tecnologie di riferimento.

temperatura di attivazione il coefficiente di trasmissione solare e il fattore solare si riducono del 40% e del 25 % rispettivamente. Il principio di funzionamento del vetro termotropico è stato introdotto nel paragrafo 2.2.4. Il polimero che caratterizza il cambiamento di aspetto del materiale termotropico è costituito da un nucleo di n-alkane, responsabile dei cambiamenti delle proprietà ottiche e solari in funzione della temperatura. Quando il materiale cambia di fase i coefficienti di riflessione solare e luminoso del materiale aumentano e i coefficienti di trasmissione si riducono a causa di fenomeni di scattering tra le molecole del polimero.

Tabella 8.2: Proprietà del vetro termotropico, *off* e *on*, sotto e sopra la temperatura di attivazione del polimero (da scheda tecnica per lastra 2x1 mm vetro chiaro con polimero $\sim 1,7$ mm).

	on	off
Trasmissione visibile	0,69	0,39
Trasmissione solare	0,69	0,41
Fattore solare	0,78	0,58

Al fine di ottimizzare le prestazioni termoenergetiche del componente a seconda della stagione (fredda/calda), la vetratura presenta due possibili versi di installazione (figura 8.8):

- con camera d'aria affacciata verso l'ambiente esterno e PCM all'interno ($CS2_{in}$),
- con camera d'aria affacciata verso l'ambiente interno e PCM all'esterno ($CS2_{out}$)

Le due configurazioni sono state testate separatamente durante le stagioni principali e si sono confrontate con due componenti di riferimento un triplo vetrocamera con argon e rivestimento basso emissivo e un triplo vetrocamera con layer termotropico. I principali risultati dei due prototipi sono stati pubblicati in [44].

Tabella 8.3: Calendario delle misure CS2.

Stagione	Configurazione	Periodo
Inverno	$TGU - TT + PCM(IN)$	06/03/13 al 24/03/13
Primavera	$TGU - TT + PCM(IN)$	25/03/13 al 13/06/13
Estate	$TGU - TT + PCM(IN)$	14/06/13 al 07/07/13
Estate	$TGU - TT + PCM(OUT)$	08/07/13 al 06/10/13
Autunno	$TGU - TT + PCM(OUT)$	07/10/13 al 27/10/14
Inverno	$TGU - TT + PCM(OUT)$	27/01/14 al 31/03/14

Tabella 8.4: Descrizione dei prototipi.

strato	spessore [mm]
<i>CS2 TGU – TT + PCM</i>	
Vetro termotropico (4 +1,5 + 4 mm)	9,5
Vetro extrachiaro	8
Intercapedine d'argon / PCM RT35	15
Vetro extrachiaro	8
Intercapedine d'argon / PCM RT35	15
Vetro extrachiaro basso emissivo	4
<i>R – CS2 TGU</i>	
Vetro extrachiaro	8
Intercapedine d'argon	15
Vetro extrachiaro	8
Intercapedine d'argon	15
Vetro extrachiaro basso emissivo	4
<i>R – CS2 TGU + TT</i>	
Vetro termotropico (4 +1,5 + 4 mm)	9,5
Vetro extrachiaro	8
Intercapedine d'argon	15
Vetro extrachiaro	8
Intercapedine d'argon	15
Vetro extrachiaro basso emissivo	4

CS2-II monitoraggio

SCOPO del monitoraggio e dell'elaborazione dei dati:
confrontare la prestazione energetica e luminosa del CS2 con quella dei riferimenti, verificare la prestazione in campo di materiale termotropici accoppiati a materiali a cambiamento di fase o in triplovetrocamera (vedi paragrafo 9.2).

Il monitoraggio del caso studio CS2 è ancora attivo e sono state testate le due configurazioni del PCM (vedi tabella 8.1.3). Le misure sono state condotte in una delle due TWINS, e sono stati impiegati i seguenti sensori collegati ad un acquisitore per il monitoraggio in continuo (vedi figura 8.7):

- 4 solarimetri (S), uno dei quali misura la radiazione solare incidente sul piano della facciata, e gli altri tre i valori di radiazione solare trasmessa attraverso le tre specchiature (dal basso CS2, RCS2 TGU-TT, RCS2 TGU),
- 3 termoflussimetri (HF), posizionati sul lato interno ai tre livelli di misura (1,2 e 3),
- 10 termocoppie (T), per la misura della temperatura dell'aria e della superficie interna ed esterna.

Parallelamente al monitoraggio energetico si sono effettuate delle misure puntali di luce con luxmetro portatile e una campagna di immagini all'infrarosso.

8.2 I sistemi di facciata attiva

8.2.1 CSa-La facciata climatica Teleya

La facciata Teleya è stata monitorata durante una campagna sperimentale nel 2004 sulla cella di prova TWINS. Due diverse configurazioni sono state testate: una con ventilazione ibrida dell'intercapedine e l'altra con ventilazione meccanica. Nel lavoro di tesi si sono utilizzati i soli dati sperimentali della facciata meccanica. I dati sperimentali del sistema di facciata prodotto da Teleya con tenda a rullo sono stati utilizzati per validare il modello di calcolo semplificato. Si descrive brevemente la tecnologia di facciata e si rimanda per i dettagli alle tesi di dottorato di *F. Zanghirella* e *C. Micono* [66],[95]. La facciata presenta due pelli vetrate con le seguenti caratteristiche:

- una pelle esterna con un vetrocamera chiaro + chiaro 8 \ 15 \ 6 mm,
- una tenda a rullo in fibra di vetro + PVC con rivestimento riflettente sul lato rivolto verso l'esterno, posta nell'intercapedine dello spessore di 140 mm,
- una pelle interna costituita da un vetro singolo chiaro da 6 mm.

Il principio di funzionamento della facciata prevede che l'aria dell'ambiente fluisca nell'intercapedine attraverso delle bocchette posizionate nella parte bassa della facciata e venga ripresa nella parte superiore grazie anche alla presenza di ventilatori. La facciata è stata testata sperimentalmente con diverse portate d'aria in intercapedine. Per il modello si è utilizzata la configurazione con la portata d'aria più elevata pari a $56 \text{ m}^3/\text{h}$.

CSa-II monitoraggio

SCOPO del monitoraggio:
confrontare la prestazione energetica del CSa con quella di un vetrocamera riflettente, ottimizzare la strategia di ventilazione meccanica.

SCOPO dell'elaborazione:
Validazione e calibrazione del modello MATS (capitolo 7 e 10).

Il sistema di misura della facciata a ventilazione meccanica è costituito da 69 sensori collegati ad un datalogger (vedi figura 8.9):

- temperature superficiali interne ed esterne ai diversi livelli,
- temperature dell'aria in ingresso ed in uscita dall'intercapedine,
- temperature dell'aria interna ed esterna,
- temperature dell'aria in intercapedine,

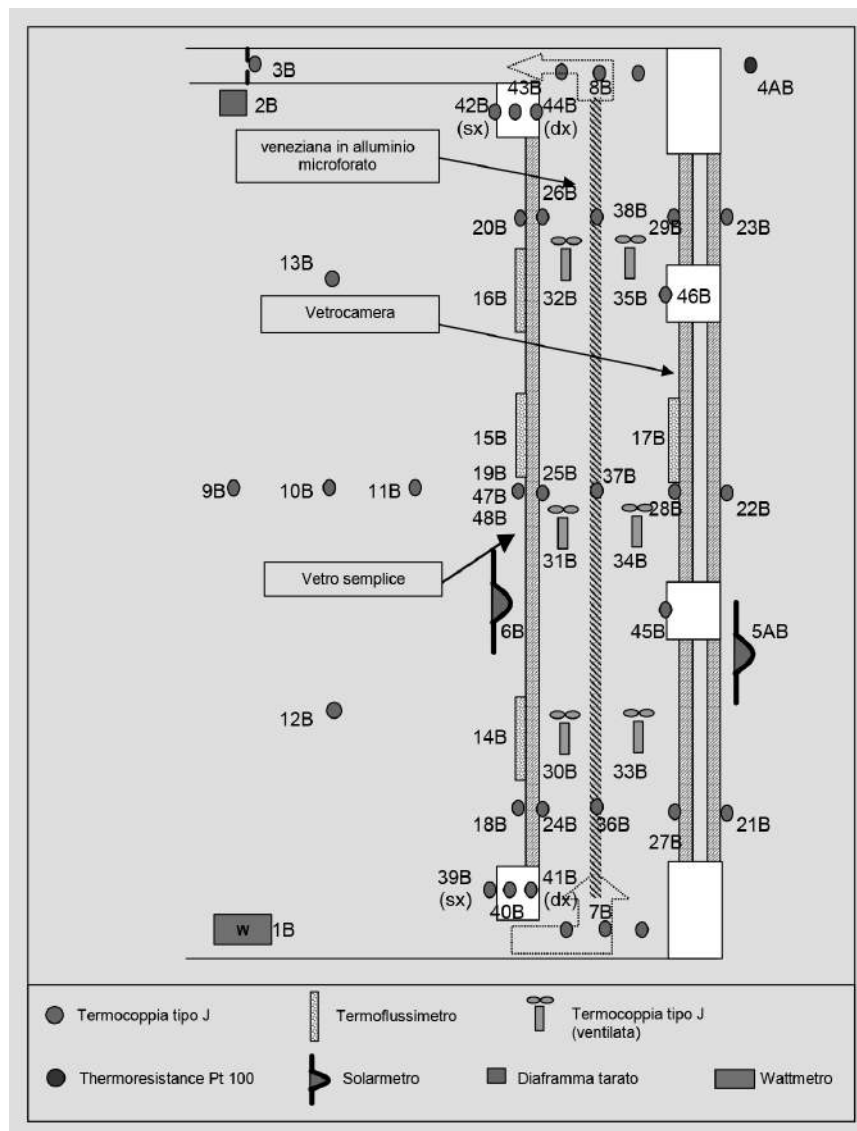


Figura 8.9: Schema dei sensori CSa da [95].

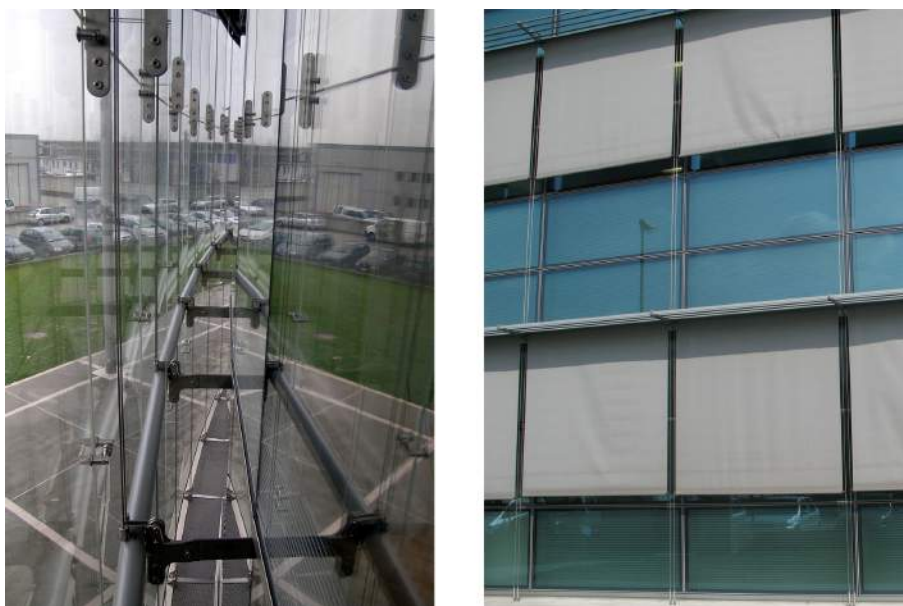


Figura 8.10: La facciata attiva Avant Grip a sinistra, la facciata passiva a destra.

- temperature superficiali della schermatura,
- temperature superficiali del telaio,
- flusso termico sulla pelle interna ai tre livelli di misura, e sulla pelle esterna (lato interno) sul livello centrale,
- solarimetro per misurare la radiazione solare incidente e trasmessa.

Ulteriori dettagli ed informazioni si possono trovare in [66],[95], [72] e [96].

8.2.2 CSb-La facciata climatica Somec

La facciata climatica CSb si trova nella sede dell'azienda produttrice Somec a S. Vendemiano (TV) e si sviluppa in modo continuo su due piani fuori terra della zona uffici dell'edificio. Il progetto di monitoraggio prevede di misurare la prestazione termica del sistema di facciata attivo "active grip" ai due piani e di confrontarlo con la prestazione di una facciata definita passiva.

La tecnologia della facciata attiva e passiva presentano la stratigrafia riportata in tabella 8.5. Il principio di funzionamento della facciata è stato testato nelle diverse stagioni e per più anni di monitoraggio. Si è verificata l'efficienza di funzionamento di diverse configurazioni di facciata; in funzione alla posizione delle schermature in intercapedine e interne e in funzione della strategia adottata per il sistema di ventilazione della cavità. Riguardo a questo ultimo punto la facciata Avant Grip presentava la possibilità di raffreddare l'aria da immettere in intercapedine con l'acqua di pozzo per i periodi caldi. In funzione della temperatura dell'aria in uscita dall'intercapedine durante le mezze stagioni poteva essere attivato questa integrazione. Il principio di funzionamento della facciata prevede che:

- In inverno si crei un “buffer” caldo, l’ambiente interno non confina direttamente con l’esterno, ma con un ambiente a temperatura maggiore, l’intercapedine.
- In estate l’aria che fluisce nell’intercapedine rimuove parte della radiazione solare assorbita dalla schermatura evitando il suo ingresso nell’ambiente interno.

La portata nominale dell’aria in intercapedine è pari a $100 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ e considerando che la facciata del caso studio è larga 1,84 m e la densità volumica dell’aria è assunta costante pari a $1,2 \text{ kg/m}^3$, si è utilizzato nei calcoli il valore di portata pari a 0,22 kg/s.

Tabella 8.5: Stratigrafia del sistema di facciata attiva e passiva simulate.

Layer (dall’esterno all’interno)	Spessore [mm]
CSb - Facciata attiva	
Optiwhite	12
Intercapedine ventilata	112
Tenda Slatter	-
Intercapedine ventilata	602
Optitherm SN8	7.95
Intercapedine 90% argon	15
Optiwhite	10
R-CSb - Facciata passiva	
Tenda Helioscreen, Serge, 2165	
Satfir 6	5.85
Intercapedine d’aria	16
Clear 04	3.85

CSb-II monitoraggio

SCOPO del monitoraggio:
confrontare la prestazione energetica della facciata attiva rispetto a quella passiva.

SCOPO dell’elaborazione: verificare la validità dei parametri prestazionali tradizionali, caratterizzare dal punto di vista energetico e del comfort ambientale la facciata attiva.

Il sistema di misura, costituito da 39 sensori collegati ad un datalogger, è stato realizzato con l’obiettivo di raccogliere informazioni relative ai fenomeni termici e fluidodinamici che caratterizzano la facciata attiva e la facciata passiva. Il sistema di misura della facciata attiva è composto da:

- 19 termocoppie di tipo T e J per la misura di:
 - temperatura della superficie del vetro esterno rivolta verso l’intercapedine,

- temperatura della schermatura solare,
 - temperatura dell'aria in ingresso e uscita dalla facciata attiva,
 - temperatura della superficie del vetro interno rivolta verso l'ambiente interno,
 - temperatura aria ambiente (piano terra e piano primo) temperatura aria esterna,
- 19 termocoppie di tipo T e J per la misura di:
 - temperatura della superficie del vetro esterno rivolta verso l'intercapedine,
 - temperatura della schermatura solare,
 - temperatura dell'aria in ingresso e uscita dalla facciata attiva,
 - temperatura della superficie del vetro interno rivolta verso l'ambiente interno,
 - temperatura aria ambiente (piano terra e piano primo),
 - temperatura aria esterna,
- 4 termocoppie di tipo T e J ventilate per la misura di temperatura dell'aria nell'intercapedine della facciata attiva,
- 6 termoflussimetri per la misura dei flussi termici che attraversano la superficie del vetro interno ed esterno,
- 2 solarimetri a termopila, in posizione verticale per la misura dell'irradianza esterna e interna all'ufficio commerciale,
- 2 luxmetri, in posizione verticale per la misura dell'illuminamento esterno e interno all'ufficio commerciale,
- 1 anemometro a filo caldo per la misura della velocità dell'aria all'interno dell'intercapedine,
- 2 fotocellule per la rilevazione della presenza dello schermo solare interno.

Il sistema di misura della facciata passiva è composto da:

- 2 termocoppie di tipo J per la misura di:
 - temperatura della superficie interna del vetro,
 - temperatura delle aria ambiente,
- 1 termoflussimetro per la misura dei flussi termici che attraversano la superficie del vetro interno.

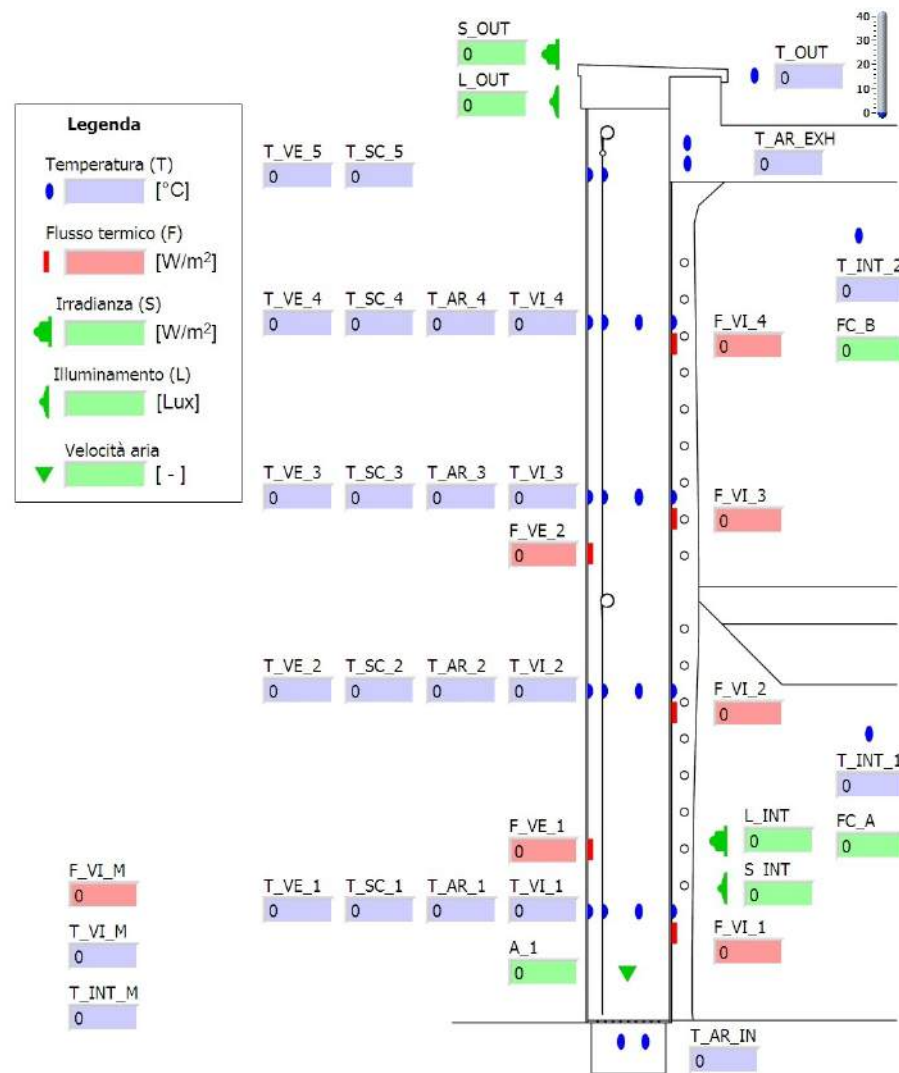


Figura 8.11: Schema dei sensori della facciata Somec, CSb.

8.2.3 CSc-Le facciate climatiche Coopsette

Il paragrafo contiene dati coperti da accordo di riservatezza, le pagine da 131 a pagina 138 non sono state riportate, contratto di riferimento “Monitoraggio e analisi sperimentale delle prestazioni termo-energetiche Coopsette ” numero 1035/2012, codice progetto 56_ *RCE12SEV01*, referente scientifico prof. V. Serra.

Capitolo 9

I risultati della sperimentazione

I risultati sono presentati e discussi per caso studio, partendo dai componenti e arrivando ai sistemi di facciata. Al termine di ogni paragrafo sono riassunti i principali risultati in modo schematico, derivanti dall'attività di monitoraggio sul caso studio. Nella sintesi dei risultati si sono indicati con "+" gli aspetti positivi della tecnologia testata mentre con "-" gli aspetti negativi e con "◇" le considerazioni generali. Nel capitolo sono presentati i risultati sperimentali di:

- CS1-Vetrocamera con PCM granulare,
- CS2-Triplovetrocamera con integrazione di materiale a cambiamento di fase e termotropico,
- CSb-La facciata climatica Somec,
- CSc-La facciata climatica Coopsette.

I dati sperimentali del caso studio CSa sono stati utilizzati per la validazione del modello di calcolo nel capitolo 10.

9.1 CS1-Vetrocamera con PCM granulare

Durante la campagna di misure si sono incontrate diverse difficoltà tecniche con l'impianto ad aria della test cell TWINS. La maggior parte dei dati sperimentali raccolti non si è potuto utilizzare a causa del mancato controllo della temperatura dell'aria interna. Si sono isolati alcuni periodi durante i quali la temperatura dell'aria all'interno della test cell si è mantenuta costante. L'analisi dei dati è stata effettuata confrontando le prestazioni monitorate per il vetrocamera con materiale a cambiamento di fase (PCM) con quelle del vetrocamera chiaro (DGU). Nel paragrafo successivo è presentata la:

- caratterizzazione energetica,
- i flussi e le energie:
 - > durante la stagione primaverile di una serie di giorni consecutivi,
 - > di una giornata tarda primavera con elevati valori di radiazione solare.

9.1.1 CS1-Caratterizzazione energetica

Durante le giornate in analisi si sono registrate temperature dell'aria esterna tra gli 8°C e i 18°C. I primi quattro giorni del periodo in analisi presentano condizioni di cielo coperto (dal 13.04.12 al 16.04.12) con valori di radiazione solare incidente sulla facciata bassi, mentre il 17.04.12 si sono monitorate condizioni di cielo sereno con valori massimi di radiazione solare incidente sul piano verticale di circa 700 W/m^2 .

Durante le giornate nuvolose si sono monitorati valori di flusso termico superficiali confrontabili tra la tecnologia di riferimento DGU e quella con PCM. Si rileva che i valori monitorati per il vetrocamera DGU sono sempre leggermente più alti rispetto a quelli misurati per la specchiatura con PCM e quindi essendo in condizioni di flusso termico uscente, le dispersioni attraverso la specchiatura con PCM sono superiori a quelle attraverso il riferimento. Durante la giornata soleggiata (17.04.12), dall'analisi dei flussi termici totali e delle energie totali emergono valori inferiori per la specchiatura con il PCM. In particolare si rileva che attraverso la specchiatura con materiale a cambiamento di fase la riduzione di energia totale durante la giornata soleggiata è pari al 66 % rispetto al vetrocamera DGU. L'andamento riportato nei grafici si è ripetuto durante il periodo primaverile, ma purtroppo non è stato possibile verificare nel periodo estivo il comportamento della tecnologia, in condizioni di picco, per i problemi tecnici di controllo della temperatura dell'aria nella test cell. Si sono riportati i risultati di una giornata calda di giugno con radiazione solare, dove gli apporti solari (short-wave) attraverso la vetrata con PCM sono inferiori del 30 % rispetto al vetrocamera. Infatti la presenza del materiale a cambiamento di fase garantisce la riduzione dei flussi termici a bassa lunghezza d'onda trasmessi attraverso il componente. I flussi termici superficiali che attraversano i due componenti di notte sono confrontabili mentre di giorno il flusso del DGU+PCM è leggermente sfasato e attenuato rispetto a quello del DGU. Non si rilevano particolari vantaggi nell'applicazione della tecnologia a cambiamento di fase dall'analisi dei flussi termici superficiali, infatti il valore di picco è uguale. L'energia totale che attraversa la vetrata con PCM è inferiore del 38% rispetto al vetrocamera DGU.

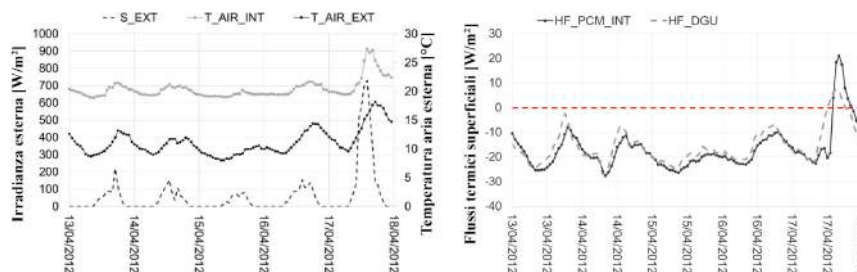


Figura 9.1: Condizioni al contorno, flussi termici superficiale che attraversano il componente trasparente DGU+PCM e il riferimento DGU.

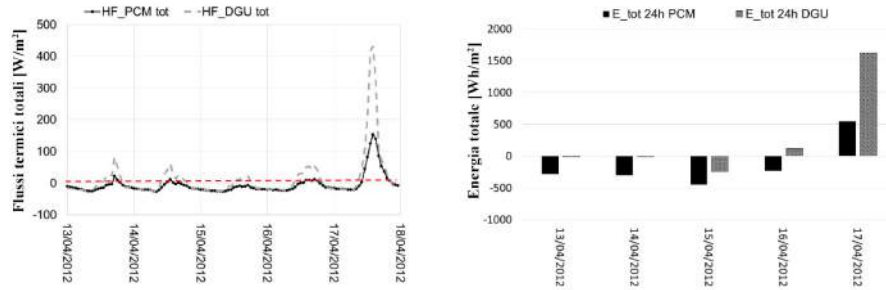


Figura 9.2: Flussi termici totali ed energie totali che attraversano il componente trasparente DGU+PCM e il riferimento DGU.

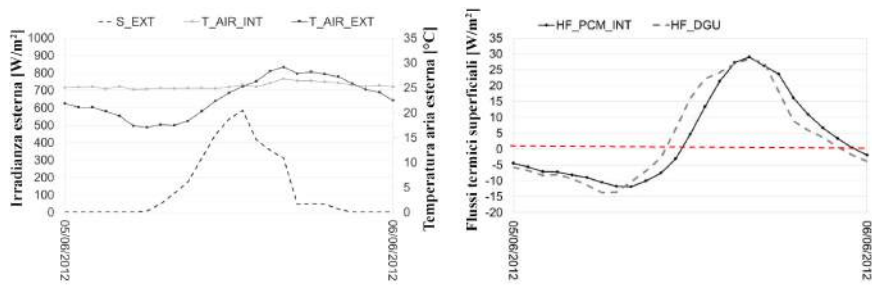


Figura 9.3: Giornata in analisi, condizioni al contorno, flussi termici superficiale che attraversano il componente trasparente DGU+PCM e il riferimento DGU.

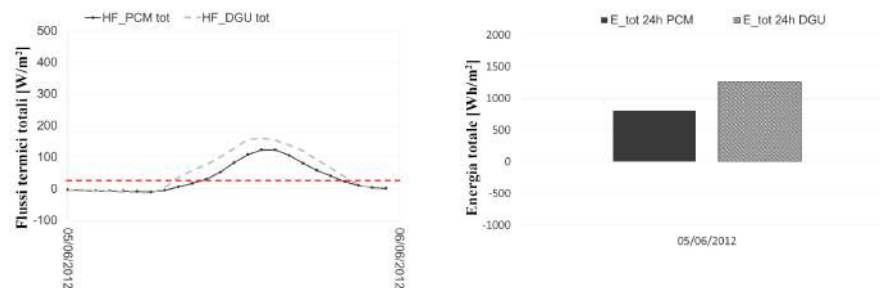


Figura 9.4: Giornata in analisi, flussi termici totali ed energie totali che attraversano il componente trasparente DGU+PCM e il riferimento DGU.

Sintesi risultati CS1:

- Il PCM granulare è collassato all'interno del vetrocamera vedi paragrafo 8.1.2.
- In assenza di radiazione solare diretta i due componenti DGU e DGU+PCM si comportano in modo confrontabile, ma la trasmissione solare e luminosa è inferiore attraverso il componente con PCM.
- Non si rilevano particolari vantaggi nell'applicazione della tecnologia a cambiamento di fase dall'analisi dei flussi termici superficiali.
- + In presenza di radiazione solare diretta il componente con PCM riduce i valori di energia entrante in ambiente di oltre il 60%.

9.2 CS2-Triplo vetrocamera con integrazione di materiale a cambiamento di fase e termotropico

La tecnologia è stata confrontata con le due tecnologie di riferimento. Durante la sperimentazione sono state monitorate due diverse configurazioni per il CS2; CS2out e CS2in, con PCM nella camera verso l'esterno e verso l'interno. Nei paragrafi successivi sono presentati:

- la caratterizzazione luminosa,
 - i parametri prestazionali sintetici
 - > il coefficiente di trasmissione luminosa
- la caratterizzazione energetica,
 - i parametri prestazionali sintetici
 - > il coefficiente di trasmissione solare
 - > la conduttanza termica
 - i flussi e le energie:
 - > il confronto tra CS2out e CS2in periodo estivo
 - > il confronto tra CS2out e CS2in periodo invernale

9.2.1 CS2-Caratterizzazione luminosa

Per caratterizzare il comportamento dinamico delle tecnologie in analisi da un punto di vista illuminotecnico si sono identificate due giornate a novembre con condizioni al contorno di cielo coperto e cielo sereno. Durante queste due giornate si sono condotte delle misure puntuali con luxmetro portatile (vedi paragrafo 5.1.3) dei valori di illuminamento verticale. La misura è stata condotta ad ogni ora e si sono misurati:

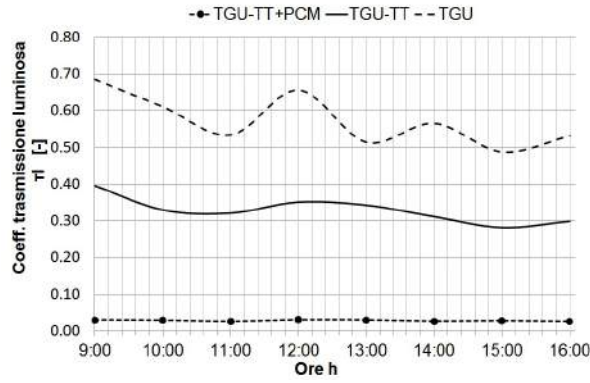


Figura 9.5: Andamento del coefficiente di trasmissione luminosa, giornata con cielo coperto (8/11/2013).

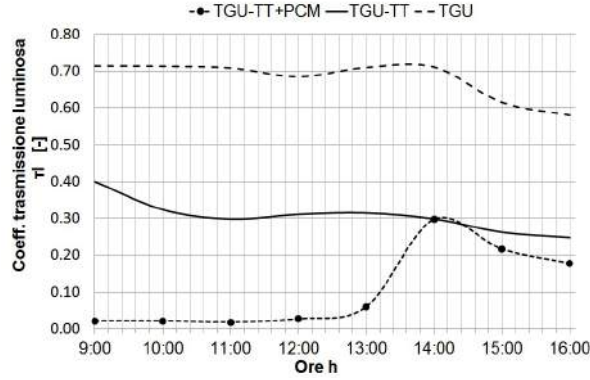


Figura 9.6: Andamento del coefficiente di trasmissione luminosa, giornata con cielo sereno (11/11/2013).

- l'illuminamento verticale dietro al $TGU - TT + PCM$,
- l'illuminamento verticale dietro al $TGU - TT$,
- l'illuminamento verticale dietro al TGU ,
- l'illuminamento verticale esterno.

Avendo effettuato la sperimentazione in un'unica test cell, particolare attenzione è stata posta nel posizionare il sensore vicino alla specchiatura in modo da limitare l'influenza delle altre tecnologie sulla misura. Nell'analisi dei risultati si deve tenere in conto che le tre tecnologie essendo posizionate una sopra l'altra vedono una porzione di volta celeste diversa. Contemporaneamente si sono effettuate delle fotografie per documentare lo stato delle tecnologie vedi figura 9.7 e 9.8. In figura 9.5 e 9.6 si è rappresentato l'andamento orario del coefficiente di trasmissione luminosa calcolato secondo l'equazione 6.32.

Coefficiente di trasmissione luminosa (τ_l), cielo coperto Durante la giornata con cielo coperto (08/11/2013), le tre tecnologie sotto analisi sono rimaste in uno stato fisico pressoché invariato; il materiale a cambiamento di fase ha mantenuto la sua fase solida e il vetro termotropico non si è attivato. I valori di illuminamento all'esterno e trasmesso attraverso le tecnologie sono bassi. Si sono calcolati dei valori medi di trasmissione luminosa riportati in tabella 9.1.

La tecnologia TGU-TT+PCM abbassa notevolmente i valori di illuminamento interno, quando il materiale PCM non cambia la fase e rimane solido. Infatti si è calcolato un coefficiente di trasmissione luminosa medio pari a 0,03, mentre per il vetro TGU-TT di 0,33 e per il TGU di 0,57. Rispetto alla soluzione tradizionale il vetro TGU-TT+PCM riduce la trasmissione luminosa di più del 95%. Il vetro termotropico non si è attivato durante la giornata in analisi perché la sua superficie non ha raggiunto la temperatura critica, ma i coefficienti di trasmissione luminosa calcolati sono solo leggermente maggiori rispetto ai valori misurati durante la giornata con cielo sereno. La differenza tra layer termotropico off e on, non è così evidente. Una delle possibili cause è il fatto che il materiale termotropico è accoppiato in un componente composto da un triplo vetrocamera da cui derivano le proprietà globali del componente.

Tabella 9.1: Coefficienti di trasmissione luminosa (τ_l) cielo coperto.

$TGU - TT + PCM$	$TGU - TT$	TGU
0,03	0,33	0,57

Coefficiente di trasmissione luminosa (τ_l), cielo sereno Nella giornata con cielo sereno (11/11/2013), il vetro termotropico ha modificato la sua fase ed ha assunto un aspetto lattiginoso per tutto il periodo di analisi, mentre il materiale a cambiamento di fase (PCM), inizialmente allo stato solido, si è completamente liquefatto alle ore 17:00. Attraverso il componente $TGU - TT + PCM$ sono trasmessi valori di illuminamento relativamente bassi con un coefficiente di trasmissione luminosa minore di 0,05 nelle ore mattutine, a causa dello stato solido del materiale. Intorno circa alle ore 12:00, tuttavia, i valori iniziano a crescere rapidamente, a causa del passaggio del PCM al suo stato liquido. Dalle 14:00 i coefficienti di trasmissione luminosa del vetro $TGU - TT + PCM$ sono uguali a quelli del componente $TGU - TT$ pari a circa 0,30. Infatti quando il PCM è liquido le due tecnologie sono confrontabili. Nella giornata in analisi non si sono riportati i valori medi di coefficiente di trasmissione luminosa in quanto la dinamicità delle tecnologie non potrebbe essere descritta. Dal confronto dei grafici 9.5 e 9.6 emerge che il valore del coefficiente di trasmissione luminosa con cielo sereno e layer termotropico attivato e cielo coperto sono confrontabili.



Figura 9.7: Confronto tra giornata a cielo coperto e a cielo sereno. Immagini all'esterno e all'interno della cella di prova dalle ore 09:00 alle 12:00.



Figura 9.8: Confronto tra giornata a cielo coperto e a cielo sereno. Immagini all'esterno e all'interno della cella di prova dalle ore 13:00 alle 16:00.

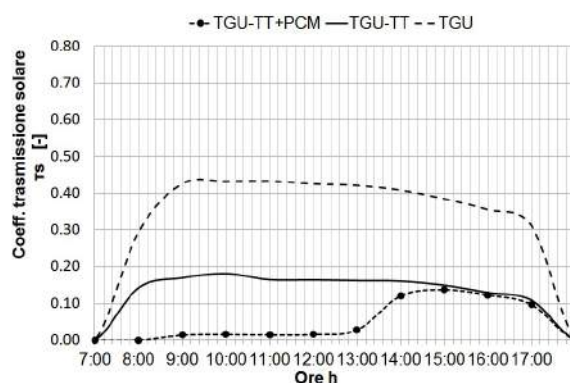


Figura 9.9: Coefficiente di trasmissione solare cielo sereno.

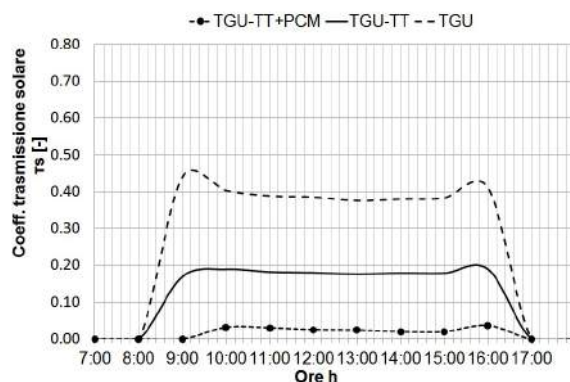


Figura 9.10: Coefficiente di trasmissione solare cielo coperto.

9.2.2 CS2-Caratterizzazione energetica

Coefficiente di trasmissione solare (τ_s) Il parametro è stato calcolato secondo l'equazione 6.9.

Il coefficiente di trasmissione solare è stato analizzato per le stesse giornate in cui si è effettuata l'analisi del coefficiente di trasmissione luminosa nel paragrafo precedente 9.2.1. I risultati sono mostrati nella figura 9.9 e 9.10. I grafici mostrano che il coefficiente di trasmissione solare del sistema TGU-TT+PCM si attesta intorno a valori inferiori al 0,05, mentre quando il materiale *PCM* cambia la fase (figura 9.9) i valori salgono fino ai valori del vetro TGU-TT, pari circa a 0,20. Rispetto al riferimento TGU per il quale si sono calcolati valori intorno allo 0,40, la tecnologia con il termotropico (TGU-TT) mostra valori inferiori di circa la metà. Questa caratteristica risulta essere particolarmente utile nel periodo estivo quando gli apporti solari costituiscono un carico per l'impianto di raffrescamento, mentre nel periodo invernale possono costituire un apporto gratuito. La tecnologia TGU-TT presenta coefficienti di trasmissioni solare analoghi durante la giornata con cielo sereno e coperto. Si rileva che l'andamento calcolato per il coefficiente di trasmissione solare è confrontabile

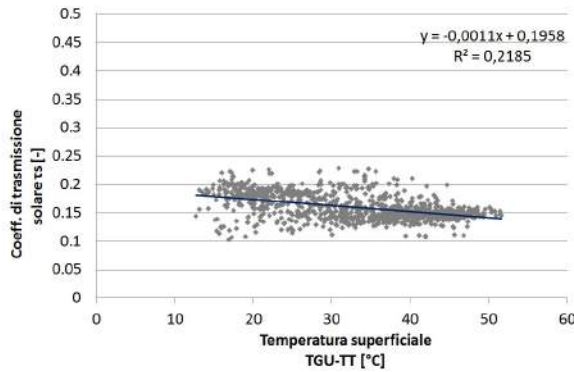


Figura 9.11: Regressione lineare per verificare la correlazione tra la temperatura superficiale e il coefficiente di trasmissione solare del vetro TGU-TT.

con quello luminoso.

Con i dati sperimentali della stagione estiva si è cercata una correlazione lineare tra i valori di temperatura superficiale del vetro con termotropico e il coefficiente di trasmissione solare. I dati estivi diurni, filtrati dei dati notturni sono stati utilizzati per verificare l'esistenza di una correlazione lineare tra la temperatura superficiale del vetro termotropico e la trasmissione solare. La retta di interpolazione lineare non è stata fatta passare attraverso l'origine perché a valori del coefficiente di trasmissione solare pari a zero non corrispondono temperature uguali a zero. I risultati ottenuti mostrano come il coefficiente di trasmissione solare diminuisca all'aumentare della temperatura superficiale. La regressione presenta un valore del coefficiente di correlazione R^2 (vedi appendice 11.2) non soddisfacente, infatti i punti sono dispersi intorno alla retta, ma l'andamento globale della nuvola dei punti rappresenta il comportamento fisico della tecnologia. Infine si può notare dal grafico che applicando la tecnologia del termotropico in un sistema con triplo vetrocamera il range di variazione del coefficiente di trasmissione solare è limitato tra lo 0,20 e lo 0,14.

La conduttanza termica equivalente (Λ^*) è stata calcolata tramite l'elaborazione dei dati sperimentali secondo quanto descritto in 6.1.2. Vengono presentati i valori di conduttanza termica dei tre componenti e non di trasmittanza perché il valore di R^2 di questi ultimi erano inferiori. I grafici a dispersione in figura 9.12 rappresentano l'interpolazione lineare tra il valore del flusso termico superficiale (in ordinata) e la differenza di temperatura superficiale interna ed esterna delle tre tecnologie (ascisse). La retta di regressione della nuvola dei punti è stata fatta passare dall'origine degli assi. L'analisi è stata condotta sulle sole ore notturne, in un intervallo orario compreso, in un primo momento, tra le 23:00 e le 6:00, ma non ritenendo i risultati soddisfacenti il periodo è stato ulteriormente ridotto dalle ore 02:00 alle 4:00. In questo modo si esclude la dinamica della radiazione solare e ci si posiziona nella condizione più vicina alla stazionarietà. Proprio per questo motivo analizzando i risultati non emergeranno le differenze che si sono rilevate nei flussi termici e nelle energie perché la dinamicità del componente non può essere caratterizzata con questo parametro.

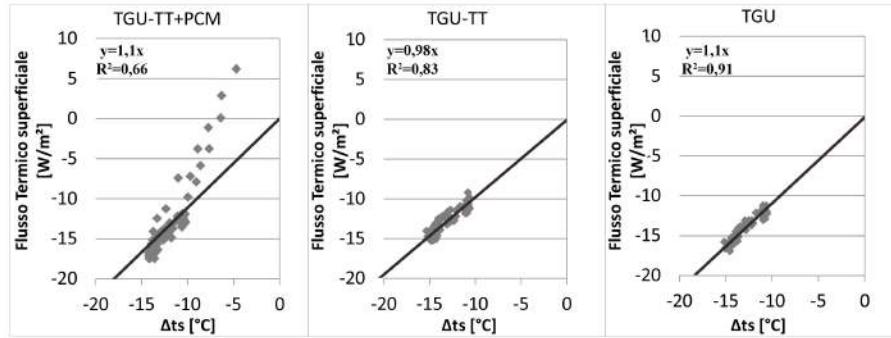


Figura 9.12: Regressione lineare per calcolare la conduttanza termica dei tre componenti trasparenti.

- Componente TGU: trattandosi di un componente tradizionale con caratteristiche chimico-fisiche costanti, il valore ottenuto di conduttanza è pari a $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ con un valore di R^2 soddisfacente pari a 0,91.
- Componente TGU-TT: il valore ottenuto di conduttanza è pari a $0,98 \text{ W/m}^2\text{K}$ con un valore di R^2 di 0,83. Avendo effettuato l'analisi di notte il layer termotropico non è attivo. Dal calcolo effettuato risulta che il layer termotropico contribuisce ad aumentare la resistenza termica del componente infatti si è calcolato il valore più basso di conduttanza termica.
- Componente TGU-TT+PCM: il valore ottenuto di conduttanza è pari a $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ con un valore di R^2 di 0,66. Per il componente con il PCM si è calcolato il valore di R^2 più basso che indica che la regressione non è affidabile e che il comportamento del sistema non può essere caratterizzato tramite questo modello. In particolare si nota che per valori di flusso termico uguale a zero non corrisponde una differenza di temperatura uguale a zero. Il comportamento è rappresentativo degli effetti dinamici del materiale a cambiamento di fase che accumula energia e la rilascia in un secondo tempo. Interpolando la nuvola di punti con una retta che non passi per l'origine si ottengono valori di R^2 più elevati pari a 0,83.

Confronto tra CS2out e CS2in periodo estivo I primi risultati sono stati presentati in *F. Goia et al.* [44] dove si è confrontata la prestazione energetica della configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ e $TGU - TT + PCM(out)$ nel periodo estivo. Per confrontare la prestazione delle due tecnologie si sono selezionati 3 giorni per il componente CS2out e per CS2in¹. Le giornate selezionate presentano valori di irraggiamento solare rispettivamente medi, bassi ed elevati. La giornata media è stata selezionata prendendo come riferimento i dati climatici medi per il mese selezionato della UNI 10349 per la città di Torino. Le condizioni al contorno delle giornate selezionate sono riportate nella tabella 9.2 ed è possibile notare che i valori di irraggiamento e temperatura dell'aria esterna sono confrontabili tra le due configurazioni in analisi.

¹I giorni selezionati sono per CS2out 18/07/13, 19/07/13 e 22/07/13 mentre per CS2in 20/06/13, 02/07/13 e 05/07/13.

Tabella 9.2: Condizioni al contorno per il periodo estivo.

Giorno	Irraggiamento giornaliero kWh/m^2	Temperatura media gior- naliera dell'aria esterna $^{\circ}C$	Temperatura massima giornaliera dell'aria esterna $^{\circ}C$	Temperatura minima giornaliera dell'aria esterna $^{\circ}C$
Cs2in				
<i>Basso H</i>	1,1	21,6	23,6	18,1
<i>Medio H</i>	3,0	24,3	29,6	19,8
<i>Alto H</i>	3,7	27,9	33,0	21,7
Cs2out				
<i>Basso H</i>	1,4	19,4	22,3	16,9
<i>Medio H</i>	2,9	23,5	29,1	19,0
<i>Alto H</i>	3,7	27,6	33,2	22,2

In figura è rappresentato l'andamento dei flussi termici superficiali per i giorni selezionati, il grafico *a*) è relativo alla configurazione CS2in, mentre il *b*) a CS2out. Le due configurazioni CS2in e CS2out sono state confrontate con la tecnologia del triplo vetrocamera (TGU). Nel grafico in figura 9.13 si può notare l'apporto in termini inerziali della tecnologia a cambiamento di fase. I flussi termici superficiali che attraversano la tecnologia CS2 sono sfasati e attenuati rispetto alla tecnologia tradizionale di riferimento. Il fenomeno è dovuto all'incremento della capacità termica del componente trasparente grazie alla presenza del materiale a cambiamento di fase nell'intercapedine. La riduzione maggiore si rileva quando si hanno elevati valori di irraggiamento giornaliero, i flussi termici superficiali scambiati attraverso il componente con PCM sono inferiori di circa $1/3$ rispetto alla tecnologia di riferimento TGU. L'energia che viene accumulata dal materiale a cambiamento di fase è rilasciata durante la sera, a partire dalle 18:00, verso l'ambiente interno. Infatti nelle ore del tardo pomeriggio il flusso termico superficiale che attraversa il componente TGU tende a seguire l'andamento della radiazione solare, decrescendo, mentre il componente con materiale a cambiamento di fase presenta valori di flusso termico positivo, che corrispondono alla coda termica, dovuta al rilascio del calore accumulato da parte del PCM durante la giornata. Questo comportamento è particolarmente evidente quando durante il giorno sono presenti elevati valori di radiazione solare. Durante le due giornate con elevati valori di irraggiamento è possibile notare due comportamenti diversi delle tecnologie a confronto:

- la configurazione con il PCM all'interno $TGU - TT + PCM(in)$ è sempre in grado di ridurre i flussi termici totali attraverso il componente, fino ad un valore minimo di $35 W/m^2$ contro i $250 W/m^2$ della tecnologia TGU,
- la configurazione con il PCM all'esterno $TGU - TT + PCM(out)$ è in grado di ridurre i flussi termici totali attraverso il componente fino ad un valore massimo di $70 W/m^2$ contro i $250 W/m^2$ della tecnologia TGU.

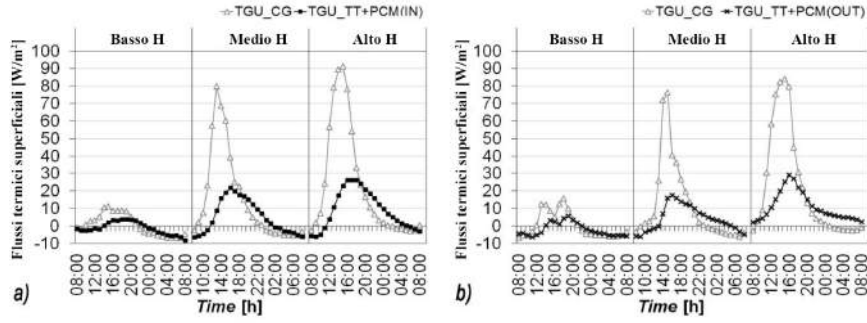


Figura 9.13: Flussi termici superficiali che attraversano la configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU.

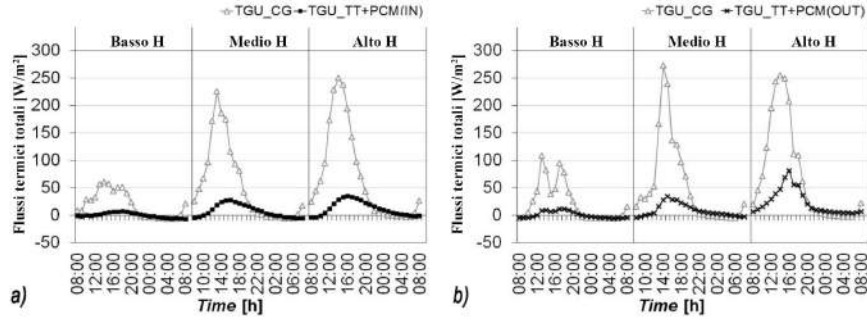


Figura 9.14: Flussi termici totali che attraversano la configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU.

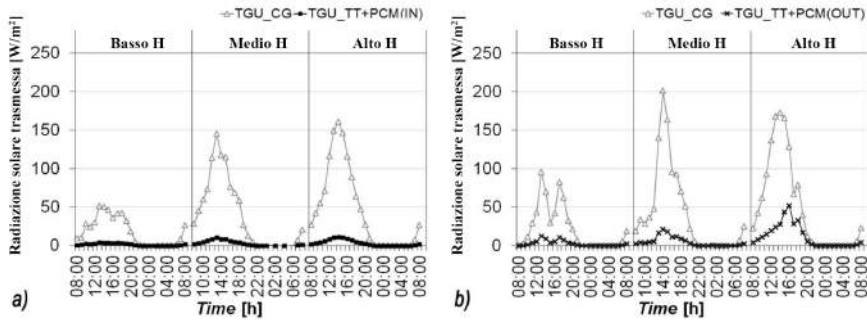


Figura 9.15: Radiazione solare trasmessa attraverso la configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU.

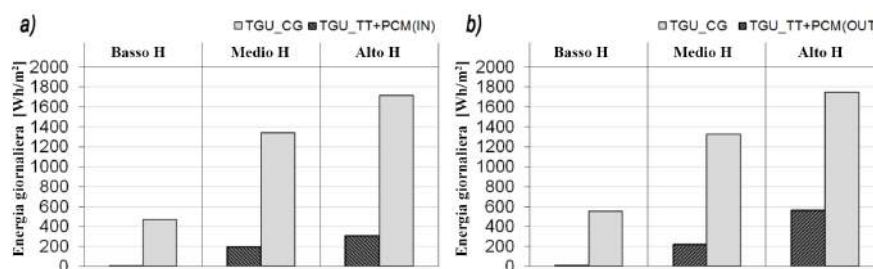


Figura 9.16: Energia giornaliera attraverso la configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU.

La differenza tra le due tecnologie è dovuta alla posizione del layer con PCM. Nel primo caso la liquefazione del materiale a cambiamento di fase non è completa mentre nel secondo caso il materiale arriva alla totale liquefazione troppo velocemente. Analizzando la radiazione solare trasmessa attraverso il componente è possibile rilevare che il componente $TGU - TT + PCM(in)$ presenta valori inferiori (valore massimo $\simeq 12 \text{ W/m}^2$) rispetto a quelli rilevati sul componente con il PCM verso l'esterno $TGU - TT + PCM(OUT)$ (valore massimo $\simeq 50 \text{ W/m}^2$). E' possibile concludere che nel periodo estivo sebbene la tecnologia $TGU - TT + PCM(out)$ fornisca buoni risultati, quelli della tecnologia $TGU - TT + PCM(in)$ sono migliori. La tecnologia $TGU - TT + PCM(in)$ è in grado di ridurre le energie totali attraverso il componente del 99%, 85%, 82% durante i giorni con bassi, medi e alti valori di irraggiamento rispetto alla tecnologia di riferimento TGU. La configurazione $TGU - TT + PCM(out)$ presenta un comportamento simile nel caso di valori bassi o moderati di irraggiamento riducendo il valore di energia tra il -97% e il -83%, ma in presenza di valori elevati di irraggiamento la riduzione rispetto al TGU scende al 68%. In figura 9.16 si può notare che per le due giornate con alto irraggiamento, i valori di energia totali calcolati per i due riferimenti TGU sono confrontabili; 1716 e 1748 Wh/m^2 . E' possibile confrontare direttamente i valori di energia attraverso il componente dinamico e si rileva che le energie che attraversano la tecnologia con PCM all'esterno sono 618 Wh/m^2 contro 353 Wh/m^2 con PCM all'interno. Le energie totali che attraversano $TGU - TT + PCM(out)$ sono circa il doppio di quelle che attraversano $TGU - TT + PCM(in)$.

Confronto tra CS2out e CS2in periodo invernale Per il periodo invernale si sono selezionate due giornate per la configurazione CS2out e due per CS2in con condizioni al contorno confrontabili ². Le giornate presentano elevati valori di irraggiamento e bassi, i valori di temperatura media dell'aria esterna tipici di una condizione invernale temperata. Non è stato possibile selezionare una giornata con valori medi confrontabili secondo la norma UNI 10349 a causa del limitato numero di giorni a disposizione (tabella 9.3). In figura 9.17, 9.18 e 9.19 sono rappresentati gli andamenti dei flussi termici superficiali, totali e

²le giornate selezionate sono per la configurazione CS2out il 03/03/14 e l'11/02/14 mentre per CS2out 24/03/13 e 16/03/13.

Tabella 9.3: Condizioni al contorno per il periodo invernale.

Giorno	Irraggiamento giornaliero kWh/m^2	Temperatura media gior- naliera dell'aria esterna $^{\circ}C$	Temperatura massima giornaliera dell'aria esterna $^{\circ}C$	Temperatura minima giornaliera dell'aria esterna $^{\circ}C$
CS2in				
<i>Basso H</i>	0,2	6,2	7,5	4,5
<i>Alto H</i>	5,5	6,0	10,4	1,8
CS2out				
<i>Basso H</i>	0,2	6,2	7,9	4,4
<i>Alto H</i>	5,6	6,4	13,9	1,0

delle energie giornaliera durante le giornate in analisi. Per la giornata con bassa radiazione solare il comportamento delle tre tecnologie è confrontabile infatti i valori di flusso termico superficiale sono intorno ai $-10 W/m^2$ per tutte e tre le tecnologie e per le due diverse configurazioni $TGU - TT + PCM(in)$ e $TGU - TT + PCM(out)$. Questo dato è confermato dall'analisi del paragrafo 9.2.2, dove le tre tecnologie presentano valori di conduttanza termica molto simili. Nella giornata con radiazione solare il comportamento delle tre tecnologie è diverso. I flussi termici più elevati si registrano per la tecnologia di riferimento il TGU che presenta un andamento dei flussi termici che segue quello della radiazione solare. I flussi termici superficiali che attraversano la tecnologia TGU-TT sono inferiori rispetto a quelli del TGU. Il layer termotropico durante entrambe le giornate con elevato irraggiamento è in grado di ridurre il picco del flusso termico che attraversa il componente di un valore compreso tra il 18 % e il 30%. Il componente TGU-TT+PCM presenta un comportamento differente in funzione delle due configurazioni;

- in posizione esterna $TGU - TT + PCM(out)$ i flussi termici superficiali sono attenuati e sfasati rispetto alle altre due tecnologie. Il materiale a cambiamento di fase si liquefa e rilascia il calore accumulato dalle 18:00 quando le altre due tecnologie hanno valori flussi termici negativi.
- In posizione interna $TGU - TT + PCM(in)$ i flussi termici superficiali sono molto simili a quelli del TGU-TT, i valori di picco sono uguali, solo leggermente sfasati. Il materiale a cambiamento di fase non si liquefa e quindi non si innesca la dinamicità del materiale a cambiamento di fase.

Le stesse considerazioni sono valide per i flussi termici totali dove si rileva che il TGU-TT presenta un andamento dei flussi perfettamente confrontabili tra le due giornate con elevati valori di irraggiamento (configurazione CS2in e CS2out). Il componente è in grado di ridurre il flusso termico totale entrante in ambiente di circa 57/58% rispetto al TGU. La riduzione percentuale che si calcola per le energie è nello stesso range di valori, tra il 59/60 % rispetto al TGU.

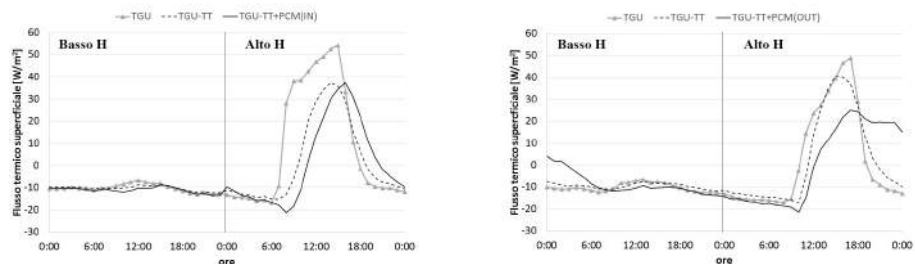


Figura 9.17: Flussi termici superficiali $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU e TGU-TT.

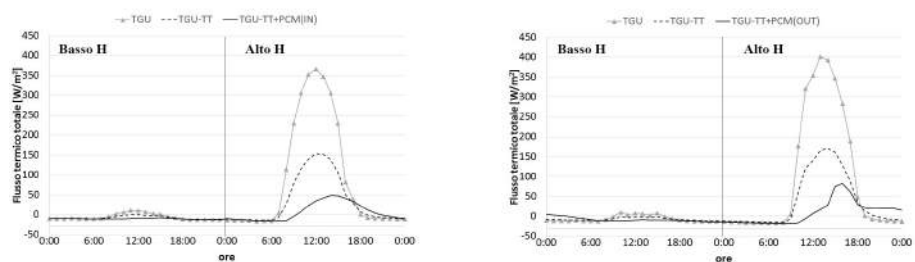


Figura 9.18: Flussi termici totali $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU e TGU-TT.

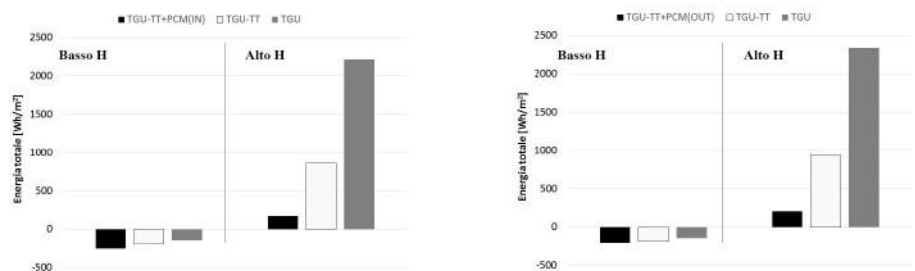


Figura 9.19: Energia giornaliera totale $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU e TGU-TT.

Per quel che riguarda il $TGU - TT + PCM(in)$ si nota che i valori di flusso termico totale seguono un andamento a campana costante mentre per il $TGU - TT + PCM(out)$ si nota che intorno al tardo pomeriggio i valori di flusso iniziano a salire a causa dello scioglimento del materiale PCM e all'esposizione diretta del sensore che rileva la radiazione solare trasmessa attraverso il componente (solarimetro $S - 1 - I$, vedi lo schema dei sensori 8.7).

In termini di energie totali, se si considera come ottimale un valore vicino allo zero, durante la giornata nuvolosa i valori di energia più bassi si sono calcolati per la tecnologia di riferimento TGU (-142 Wh/m^2). Mentre la tecnologia TGU-TT+PCM presenta la prestazione più scarsa avendo valori più elevati di energia (-255 Wh/m^2). In presenza di radiazione solare le energie che attraversano il riferimento TGU sono molto vicine, per CS2in 2217 Wh/m^2 e per CS2out 2341 Wh/m^2 . Da questo dato viene confermato che le due giornate selezionate presentano condizioni al contorno confrontabili e che le differenze lette sul componente $TGU - TT + PCM$ dipendono dalla posizione del PCM. Le energie che attraversano le due configurazioni $TGU - TT + PCM(in)$ e $TGU - TT + PCM(out)$ sono molto simili, rispettivamente 169 e 211 Wh/m^2 . Risulta una riduzione in termini di energia entrante in ambiente pari al 92% per la configurazione con PCM verso l'interno e del 91% con il PCM all'esterno. Dati i valori molto vicini non è possibile definire quale sia il comportamento migliore tra le due configurazioni. Analizzando l'andamento dei flussi termici si rileva una prestazione più interessante da parte della tecnologia $TGU - TT + PCM(out)$ che grazie alla posizione del PCM verso l'esterno in presenza di elevati valori di radiazione solare cambia la propria fase, parzialmente, anche durante l'inverno.

Sintesi risultati CS2:

- ◇ I tre componenti sono stati caratterizzati con i parametri sintetici di τ_l , τ_s , Λ^* .
- ◇ Si sono calcolati tre valori di conduttanza termica per i tre componenti testati molto vicini, rispettivamente 1,1, 0,98 e 1,1 W/m^2K per il TGU-TT+PCM, TGU-TT, TGU con R^2 pari a 0,66, 0,83 e 0,91.
- Rispetto alla soluzione tradizionale il vetro TGU-TT+PCM riduce la trasmissione luminosa tra l'82% e il 95% quando il PCM non cambia fase.
- Anche se non attivo il vetro termotropico non è perfettamente trasparente ed ha un aspetto lattiginoso.
- In assenza di radiazione solare diretta il vetro termotropico non si attiva, ma i valori di τ_s e τ_l sono vicini a quando è attivo.
- L'applicazione del layer TT nel triplo vetrocamera porta ad una riduzione della dinamicità dei parametri ottico e solari.
- + Il termotropico e il PCM allo stato solido permettono la diffusione della luce entrante limitando fenomeni di abbagliamento, durante le giornate soleggiate.
- + In presenza di elevato irraggiamento solare, nel periodo estivo, il flusso termico superficiale che attraversa il componente trasparente con il PCM è di circa 1/3 inferiore a quello che attraversa il TGU.
- + Le energie totali che attraversano il componente $TGU-TT+PCM$ sono il 10% rispetto a quelle di un TGU tradizionale in condizioni di elevato irraggiamento solare in inverno.
- ◇ in estate la configurazione migliore è risultata essere $TGU - TT + PCM(in)$, mentre per l'inverno si sono rilevate prestazioni leggermente migliori per $TGU - TT + PCM(out)$
- Quando il materiale a cambiamento di fase non è totalmente liquefatto, ci sono delle porzioni di PCM solido e altre liquide, che creano delle situazioni con dei limiti dal punto di vista dell'applicazione architettonica e fisico tecnica.
- ◇ Tra gli sviluppi futuri si potrebbe valutare se cambiando la tipologia di PCM e la sua temperatura di fusione si potrebbero avere dei vantaggi in termini di prestazione energetica.

9.3 CSb-La facciata climatica Somec

I dati sperimentali raccolti durante la campagna sperimentale Somec sono stati analizzati con il fine di determinare:

- la caratterizzazione luminosa,
 - i parametri prestazionali sintetici
 - > il coefficiente di trasmissione luminosa
- la caratterizzazione energetica,
 - i parametri prestazionali sintetici
 - > il coefficiente di trasmissione solare
 - > la trasmittanza termica equivalente
 - > il fattore solare equivalente
- i flussi e le energie
- la validità dei parametri prestazionali tradizionali,
- la valutazione del comfort ambientale
- il comfort termico

9.3.1 CSb-Caratterizzazione luminosa

Il coefficiente di trasmissione luminosa τ_l è stato calcolato secondo l'equazione 6.32 per la facciata attiva CSb. I valori calcolati, per la stagione invernale ed estiva, sono rappresentati in tabella 9.4 e si attestano tra lo 0,08-0,09 in presenza di schermatura e lo 0,13-0,32 in assenza di schermatura (il dato non è disponibile per la stagione primaverile causa rottura del luxmetro).

Tabella 9.4: Coefficienti di trasmissione luminosa CSb [-].

Inverno	
screen ON	screen OFF
0,08	0,32
Estate	
screen ON	screen OFF
0,09	0,13

9.3.2 CSb-Caratterizzazione energetica

Il coefficiente di trasmissione solare è stato calcolato per inverno, estate e primavera. I valori di τ_s sono rappresentati in tabella 9.5. Si può notare che i valori misurati per le giornate analizzate durante le diverse stagioni sono coerenti e che si è calcolato un valore tra il 0,05 e 0,06 con screen ON e 0,30

e 0,35 con screen OFF. Per la facciata di riferimento non si è potuto calcolare il coefficiente con i dati sperimentali perché non si disponeva di un solarimetro dietro la facciata R-CSb. Il valore è stato calcolato con il software WIS per le diverse stagioni. I valori medi giornalieri per la stagione primaverile, estiva e invernale sono pari a 0,50, 0,71 e 0,41.

Tabella 9.5: Coefficienti di trasmissione solare CSb.

Inverno	
screen ON	screen OFF
0,05	0,33
Estate	
screen ON	screen OFF
0,06	0,35
Primavera	
screen ON	screen OFF
0,06	0,30

La trasmittanza termica equivalente U^* Il valore della trasmittanza termica equivalente è stato calcolato con il metodo presentato nel paragrafo 3.1.1. Il parametro è stato calcolato per la facciata attiva e il riferimento per le diverse stagioni di monitoraggio con i dati di monitoraggio notturni.

Stagione estiva 2010 Nel corso dell'estate 2010 (da giugno a settembre), la trasmittanza termica equivalente calcolata per la CSb è stata di $0,41 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ($R^2=0,46$) e di $1,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ($R^2=0,85$) per la facciata passiva.

Stagione invernale 2010-2011 Nel corso dell'inverno 2010-2011 (da dicembre a marzo), la trasmittanza termica equivalente calcolata per CSb è stata di $0,65 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ($R^2=0,51$) e di $1,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ($R^2=0,88$) per la facciata passiva.

Stagione primaverile 2011 Nel corso della primavera 2011 (da marzo a giugno), la trasmittanza termica equivalente calcolata per CSb è stata di $0,51 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ($R^2=0,64$) e di $1,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ($R^2=0,86$) per la facciata passiva.

Stagione estiva 2011 Nel corso dell'estate 2011 (da giugno a settembre), la trasmittanza termica equivalente calcolata per CSb è stata di $0,38 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ($R^2=0,51$) e di $1,09 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ($R^2=0,82$) per la facciata passiva.

Il valore di R^2 per la facciata di riferimento R-CSb è sempre maggiore di 0,8, mentre per la facciata attiva CSb si sono calcolati valori più bassi tra lo 0,46 e lo 0,64. Da questo elemento emerge che i dati della facciata attiva, utilizzati per la correlazione lineare, non presentano una relazione lineare (con retta passante per l'origine) mentre per la facciata di riferimento i coefficienti di correlazione sono più attendibili. Dall'analisi dei grafici in figura 9.20, 9.21, 9.22 e 9.23 è possibile notare che la nuvola di punti che caratterizza la facciata CSb ha un andamento disperso mentre quelli della facciata R-CSb hanno un andamento più vicino alla retta interpolante. Come per il caso studio CS2 anche in questo caso a flussi termici pari a zero non corrispondono gradienti di temperatura pari a zero.

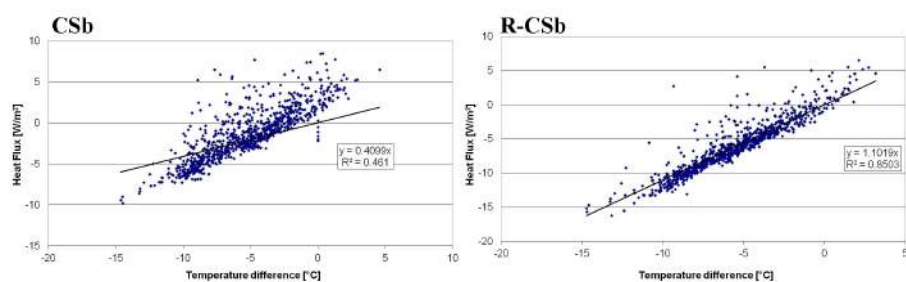


Figura 9.20: Trasmittanza termica equivalente a sinistra CSb, a destra R-CSb, estate 2010.

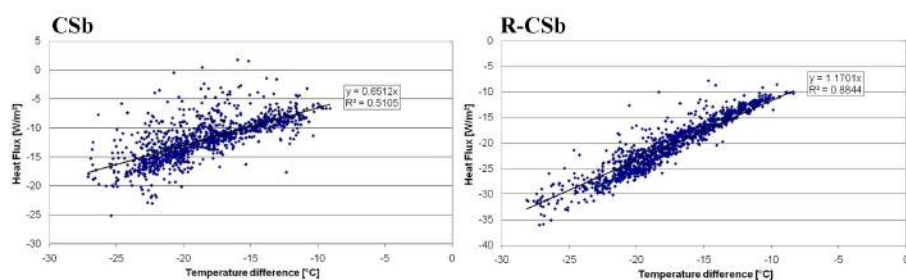


Figura 9.21: Trasmittanza termica equivalente a sinistra CSb, a destra R-CSb, inverno 2010-11.

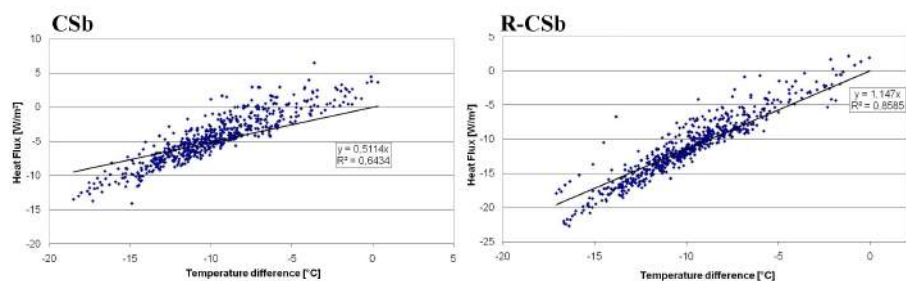


Figura 9.22: Trasmittanza termica equivalente a sinistra CSb, a destra R-CSb, primavera 2011.

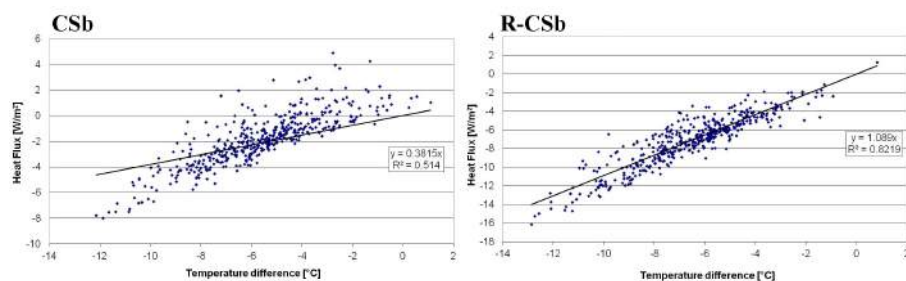


Figura 9.23: Trasmittanza termica equivalente a sinistra CSb, a destra R-CSb, estate 2011.

Il fattore solare equivalente ($TSET^*$) Per il calcolo del fattore solare equivalente si è utilizzato il metodo presentato nel paragrafo 6.1.2. Il parametro è stato calcolato utilizzando il valore di trasmittanza termica della facciata per poter eliminare la quota di flusso termico ad alta lunghezza d'onda e isolare quindi la quota a bassa lunghezza d'onda. Per il calcolo è stato utilizzato il valore di trasmittanza calcolato con i dati dell'inverno 2010-2011 pari a $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. In figura 9.24 sono riportati, rispettivamente, i valori del fattore solare equivalente giornaliero per l'estate 2010 e per l'estate 2011 per la facciata attiva CSb con tenda in intercapedine abbassata. Nel corso dell'estate 2010, il fattore solare equivalente giornaliero è variato tra 5,9 % e il 9,3 %, con un valor medio di 7,6 % ed una deviazione standard di 0,77%. Nel corso dell'estate 2011, il fattore solare equivalente giornaliero è variato tra 2,2% e 13,3%, con un valor medio di 5,5% ed una deviazione standard di 1,91%.

I flussi e le energie I flussi termici sono stati analizzati per una:

- giornata estiva confronto tra CSb e R-CSb con schermo esterno,
- giornata estiva confronto tra CSb e R-CSb,
- giornata invernale confronto tra CSb e R-CSb.

Le energie sono state analizzate:

- durante la stagione invernale, estiva e primaverile con le energie normalizzate.

I flussi termici totali, confronto CSb e R-CSb con schermo esterno, estate Nella giornata in analisi la facciata attiva presenta la tenda nell'intercapedine chiusa (screen ON) e il riferimento la tenda esterna chiusa ³. Durante la giornata analizzata si è misurato un irraggiamento giornaliero di $2446 \text{ Wh}/\text{m}^2$ sul piano verticale. Analizzando i flussi totali, si nota che la facciata passiva con schermo esterno ha una prestazione migliore nel corso di tutta la giornata, ed anche durante il periodo notturno. Di giorno in presenza di radiazione solare il flusso entrante nella facciata attiva è sempre maggiore, di notte attraverso la facciata passiva si hanno maggiori dispersioni termiche che consentono di disperdere maggiormente il calore accumulato durante il giorno. Il picco massimo di flusso entrante è di circa $50 \text{ W}/\text{m}^2$ per la facciata attiva e di poco meno di $20 \text{ W}/\text{m}^2$ per la facciata passiva.

I flussi termici totali, confronto CSb e R-CSb, estate Nella giornata in analisi la tecnologia CSb presenta la tenda in intercapedine abbassata mentre la schermatura esterna di R-CSb è aperta. La giornata analizzata presenta un irraggiamento giornaliero di $5230 \text{ Wh}/\text{m}^2$. La facciata passiva ha maggiori dispersioni termiche durante la notte, mentre la facciata attiva mostra un comportamento migliore nel pomeriggio ed in serata. Il picco della facciata attiva non tocca i $60 \text{ W}/\text{m}^2$, mentre il flusso entrante nella facciata passiva arriva a $260 \text{ W}/\text{m}^2$. Si rileva che in assenza di schermatura esterna il flusso termico totale che attraversa la facciata R-CSb è superiore di circa il 77% rispetto a quello attraverso CSb.

³La tenda esterna della facciata di riferimento non è stata testata durante l'intero monitoraggio a causa della rottura durante un temporale.

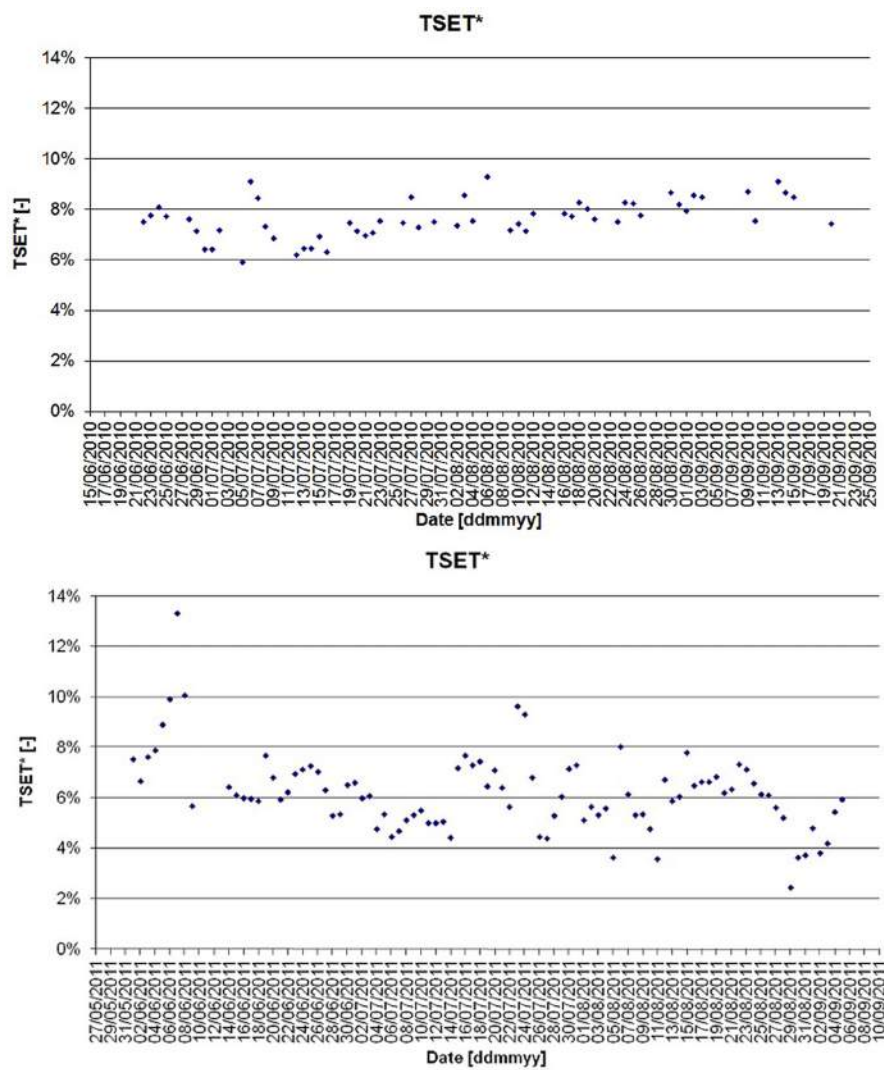


Figura 9.24: Fattore solare equivalente per l'estate 2010 sopra, estate 2011 sotto.

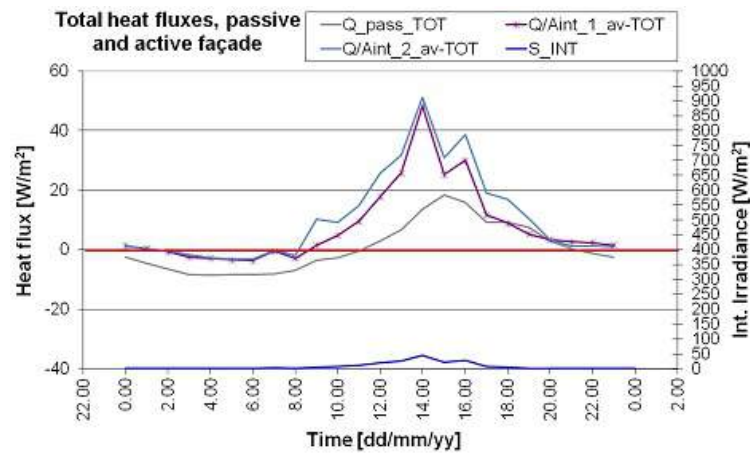


Figura 9.25: Flussi termici totali, giornata estiva, CSb e R-CSb con tenda esterna.

I flussi termici superficiali, confronto CSb e R-CSb, inverno in assenza di radiazione solare entrambe le facciate disperdono calore su tutte le 24 ore. Il flusso disperso dalla facciata attiva è in media inferiore di un terzo rispetto a quello disperso dalla facciata passiva. Si nota che alle 9:00, l'entrata in funzione dell'impianto di riscaldamento provoca per entrambe le facciate un aumento del flusso disperso: tale aumento è contemporaneo all'innalzamento della temperatura dell'aria negli uffici.

Le energie normalizzate, inverno Nella figura 9.28 è rappresentata l'energia dispersa dalle facciate nel corso della stagione invernale (dal novembre 2010 a marzo 2011), in orario diurno (dalle 8 alle 20). Per tener conto del fatto che le temperature interne nei vari locali sono risultate diverse, si è provveduto a normalizzare il fabbisogno sulla base dei gradi giorno reali cui sono state soggette le due facciate. I gradi giorno per la facciata attiva (considerando una temperatura interna pari alla media di quella dei due uffici) sono stati 1779 GG, per la facciata passiva sono stati 1725 GG. Si ottiene un valore di energia dispersa attraverso la facciata attiva di $5.6 \text{ Wh/m}^2\text{GG}$ per la facciata attiva, e di $9.8 \text{ Wh/m}^2\text{GG}$ per la facciata passiva. Il risparmio energetico, per unità di superficie di facciata, misurato per la facciata CSb rispetto al riferimento è di circa il 40% nel periodo invernale.

Le energie normalizzate, estate Nel corso della stagione estiva (da giugno 2010 al settembre 2010), in orario diurno (dalle 8 alle 20) si è calcolato il valore dell'energia normalizzata. Per tener conto del fatto che le temperature interne nei vari locali non sono confrontabili, si sono normalizzati i valori di energia sulla base dei gradi giorno reali cui sono state soggette le due facciate. Si è calcolato un valore di GG pari a 228°C per la facciata CSb e di 211 per R-CSb. Il valore di energia di cooling normalizzata per R-CSb di $54 \text{ Wh/m}^2\text{GG}$ e per CSb di $36 \text{ Wh/m}^2\text{GG}$. La facciata attiva riduce i flussi termici (long-wave) del 48 % rispetto alla facciata passiva.

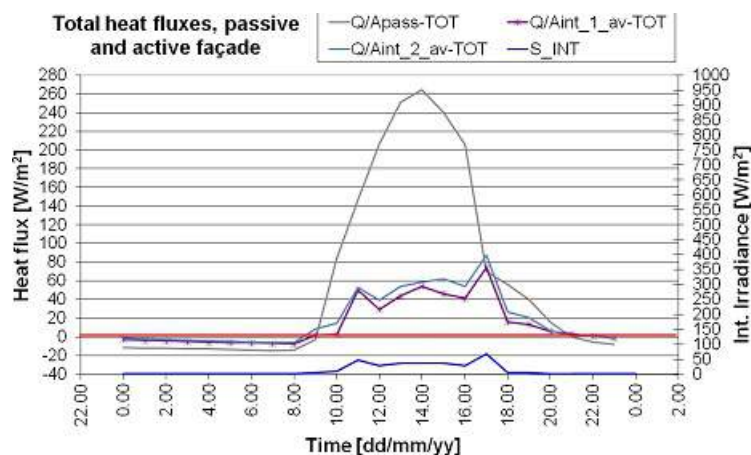


Figura 9.26: Flussi termici totali, giornata estiva, CSb e R-CSb.

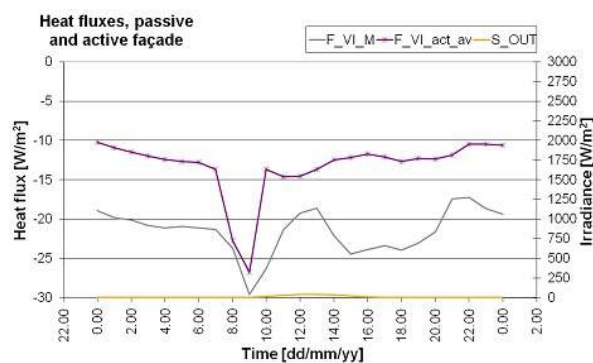


Figura 9.27: Flussi termici superficiali, giornata invernale nuvolosa, CSb e R-CSb.

Le energie normalizzate, primavera Le energie normalizzate sono state calcolate nel periodo da marzo 2011 a maggio 2011, in orario diurno (dalle 8 alle 20). Per l'analisi dei fabbisogni della stagione primaverile si sono riportati i valori di energia di heating e cooling ("long-wave") normalizzate sui gradi giorno (vedi paragrafo delle energie invernali). I gradi giorno per la facciata attiva (considerando una temperatura interna pari alla media di quella dei due uffici) sono stati 276 GG, per la facciata passiva sono stati 278 GG. Si sono ottenuti i valori rappresentati in figura 9.28. Per questa stagione è stato necessario dividere i valori di energia tra quelle positive e quelle negative. E' possibile concludere che la differenza tra le due tecnologie non è particolarmente rilevante durante la mezza stagione.

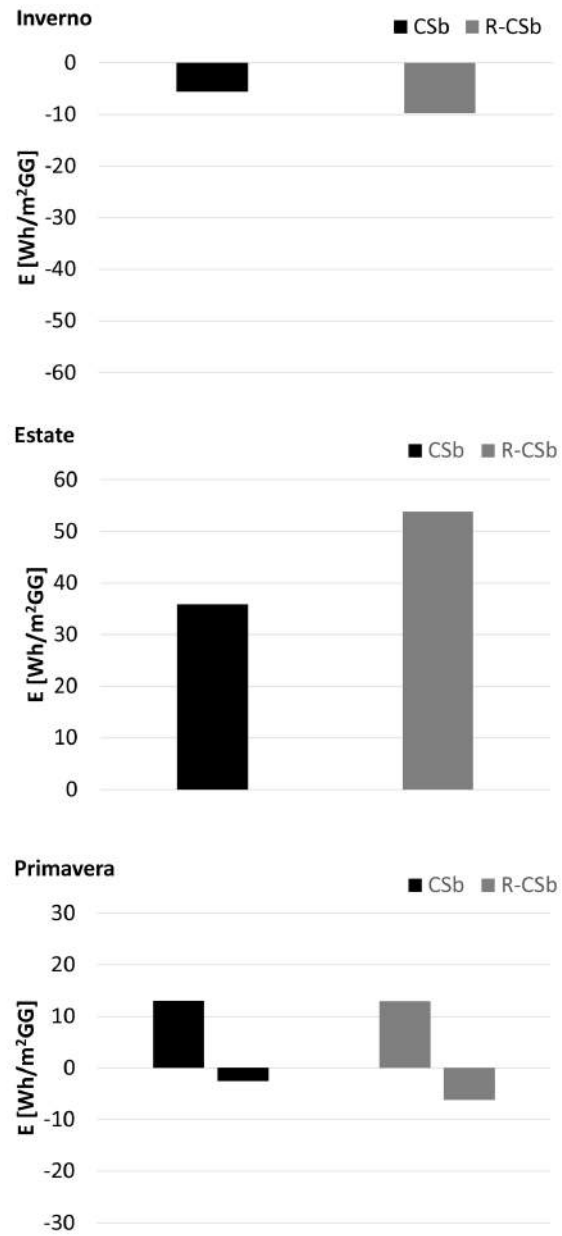


Figura 9.28: Le energie normalizzate attraverso le due tecnologie di facciata, periodo invernale, estivo e primaverile.

9.3.3 CSb-Valutazione dei parametri prestazionali tradizionali

Attraverso l'analisi dei dati sperimentali raccolti sulla facciata Csb si è verificato se i parametri prestazionali tradizionali U e g (trasmittanza termica e fattore solare) fossero in grado di descriverne il comportamento fisico tecnico della facciata attiva. Il metodo che è stato applicato, è presentato nel paragrafo 6.1.3, e i risultati delle elaborazioni sono stati pubblicati in due articoli [24], [46].

Elaborazione dei dati sperimentali con il metodo della regressione lineare Il metodo delle RL (Regressioni Lineari) è stato applicato alla facciata di riferimento e alla facciata attiva del caso studio Csb presentate nel paragrafo 8.2.2.

La facciata di riferimento Con il metodo della regressione lineare si è calcolato il valore di trasmittanza termica equivalente (U^*) e di fattore solare equivalente (g^*) della facciata di riferimento riflettente. Nella figura 9.29 è rappresentata la regressione lineare tra la differenza di temperatura dell'aria interna ed esterna e flusso termico notturno. La regressione porta ad un valore di U^* pari a $2,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ con un valore di R^2 maggiore di 0,9. Considerato il significato fisico tecnico del parametro non si è effettuato il calcolo per diverse stagioni, perché si è assunto che il parametro rimanesse costante durante l'anno e non subisse modifiche significative in funzione delle condizioni al contorno. Mentre il valore del fattore solare è stato calcolato per le diverse stagioni, infatti le proprietà ottico e solari della facciata di riferimento cambiano in funzione della stagione e sono funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare e del gradiente di temperatura tra ambiente interno ed esterno.

Attraverso la RL tra il flusso termico e la radiazione solare incidente sul componente si è calcolato il parametro g^* per l'inverno, la mezza stagione e l'estate. Nella figura 9.29 a destra è rappresentato l'andamento del fattore solare equivalente pari a: 0,36 in inverno con $R^2=0,95$, 0,32 nella mezza stagione con $R^2=0,94$, 0,18 in estate con $R^2=0,88$. Il coefficiente di correlazione per il periodo estivo non è maggiore di 0,9 probabilmente a causa della scarsa mole di dati a disposizione rispetto a quelli delle altre stagioni (l'impianto dell'azienda Somec rimaneva spento per tutto agosto). I dati sperimentali utilizzati per valutare il parametro sono stati opportunamente filtrati in modo da escludere valori di radiazione solare inferiore ai 10 W/m^2 e flussi termici negativi.

La facciata climatica CSb La stessa metodologia è stata applicata per valutare i parametri equivalenti della facciata climatica attiva, ma le difficoltà sono state maggiori rispetto al caso del riferimento. I dati elaborati sono stati filtrati e si sono utilizzati solo alcune ore della notte. Durante le ore notturne l'impianto di ventilazione nell'intercapedine è spento, ma nonostante questo è possibile che si creino dei moti d'aria nella cavità. Inoltre a causa dei diversi strati di vetro che compongono la facciata, l'inerzia termica del sistema non è trascurabile, motivo per cui per arginare la dinamica dei flussi di calore assorbiti dalla struttura, si sono usati solo alcune ore della notte dalle 3 alle 6 del mattino. Per limitare le dinamiche del sistema si è calcolato il valore della trasmittanza termica equivalente per le diverse stagioni. Dall'elaborazione dei dati sperimentali si sono

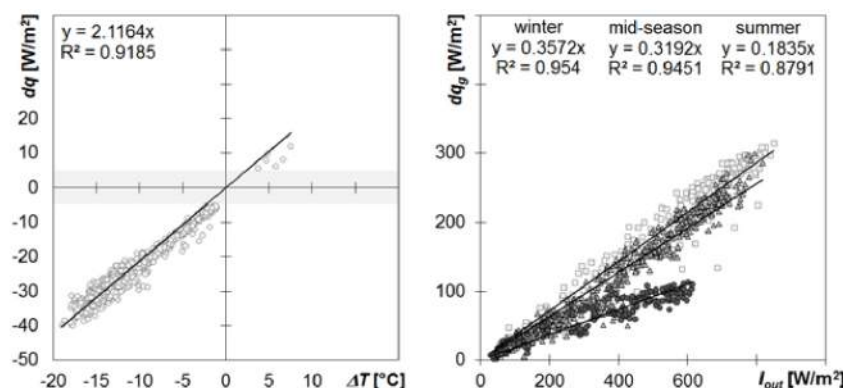


Figura 9.29: Tecnologia di riferimento. Correlazione lineare per determinare il valore di U^* a sinistra. Correlazione lineare per determinare il valore di g^* per le diverse stagioni a destra.

calcolati valori di U^* pari a $0,73 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e R^2 0,93 per il periodo invernale, $0,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e R^2 0,91 per il periodo di mezza stagione e $0,61 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e R^2 0,84 per il periodo estivo (vedi figura a sinistra 9.30). Per il fattore solare equivalente g^* si sono calcolati tre diversi valori per le tre stagioni analizzate, molto simili tra loro, ma con coefficienti di regressioni lineare non soddisfacenti. Il fattore solare equivalente è pari a 0,081 e R^2 0,52, per il periodo invernale, 0,08 e R^2 0,47, per il periodo di mezza stagione, 0,072 e R^2 0,22, per il periodo estivo. I tre valori sono molto vicini probabilmente perché l'effetto dell'angolo di incidenza della radiazione solare viene limitato dalla presenza della schermatura in intercapedine. Mentre per quel che riguarda il coefficiente di regressione si può spiegare considerando che nell'equazione che si utilizza per determinare il parametro (equazione 6.23), si sottrae al flusso termico totale la quota dovuta allo scambio termico ad alta lunghezza d'onda in modo da poter isolare la quota del flusso termico dovuta alla sola radiazione solare, e si utilizza la trasmittanza termica equivalente U^* calcolata con i dati sperimentali notturni. E' possibile che i valori di R^2 per il calcolo di g^* non siano soddisfacenti a causa del fatto che:

- il valore di U^* utilizzato nel calcolo non è rappresentativo del comportamento della facciata durante il giorno, ma descriva le sue proprietà di notte, ad impianto spento e in assenza di radiazione solare,
- la facciata climatica presenta un comportamento altamente dinamico dovuto alla ventilazione in intercapedine che non può essere caratterizzato utilizzando dei parametri sintetici.

I flussi termici nel range di $\pm 5 \text{ W}/\text{m}^2$ non sono stati considerati, così come differenze di temperature $\pm 1 \text{ °C}$.

Validazione dei parametri calcolati con RL I parametri calcolati nel paragrafo precedente sono stati utilizzati per calcolare valori di energia e flusso termico come descritto nel paragrafo 6.1.3. I parametri equivalenti di U^* e g^*

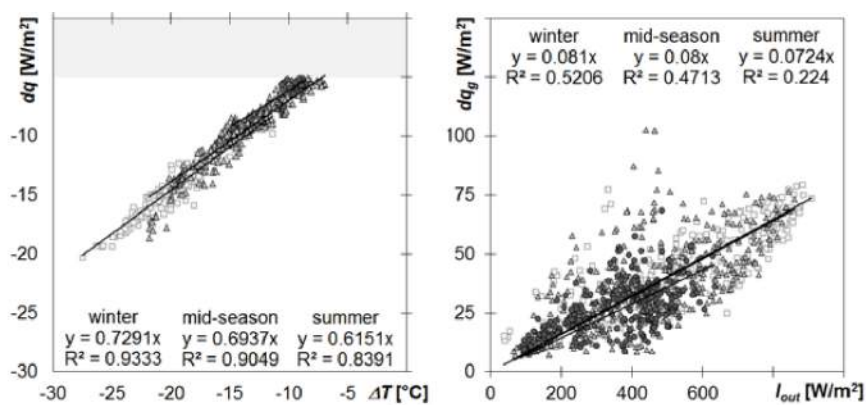


Figura 9.30: Facciata climatica CSb. Correlazione lineare per determinare il valore di U^* a sinistra. Correlazione lineare per determinare il valore di g^* per le diverse stagioni a destra.

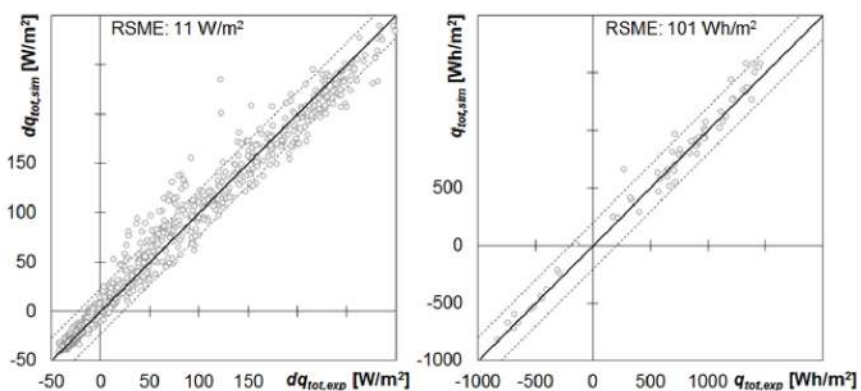


Figura 9.31: Tecnologia di riferimento. Confronto tra i flussi termici a sinistra, e le energie a destra. Valori calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL messi a confronto con i valori monitorati.

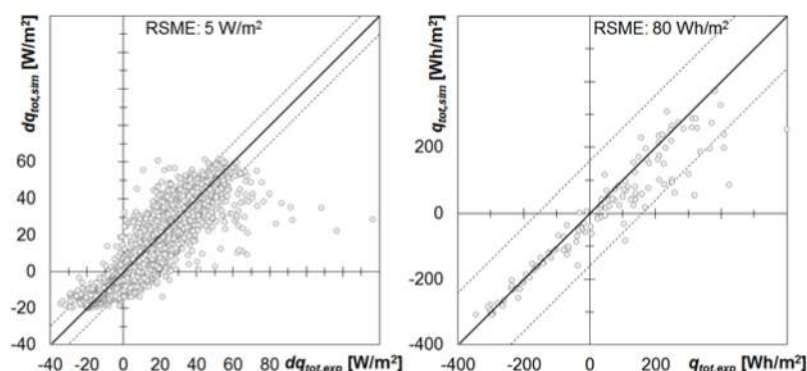


Figura 9.32: Facciata climatica CSb. Confronto tra i flussi termici a sinistra, e le energie a destra. Valori calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL messi a confronto con i valori monitorati.

sono stati utilizzati per calcolare i valori di flusso termico totale e di energia totale, che sono stati confrontati con il secondo set dei dati sperimentali.

La facciata di riferimento Nella figura 9.31 a sinistra, è rappresentato l'andamento dei flussi termici totali calcolati con i parametri rispetto ai valori misurati durante la sperimentazione. Per caratterizzare il confronto si è calcolato il valore di REQM (vedi l'appendice 11.2) pari a 11 W/m^2 . I valori di flusso termico totale variano tra un minimo di -50 W/m^2 fino a $+300 \text{ W/m}^2$ e quindi il valore di REQM è di un ordine di grandezza inferiore rispetto ai valori di flusso termico totale. Per quel che riguarda le energie si è operato con lo stesso metodo e si sono rappresentati in figura 9.31 nel grafico a destra. I valori delle energie giornaliere che attraversano la facciata climatica variano tra -1000 e 2500 Wh/m^2 . Il valore di REQM pari a 101 Wh/m^2 può dunque ritenersi soddisfacente. E' possibile concludere che i parametri prestazionali calcolati con il metodo delle RL sono rappresentativi del comportamento della tecnologia di riferimento.

La facciata climatica CSb Nella figura 9.32 a sinistra, è rappresentato il confronto tra i flussi termici totali calcolati con i parametri equivalenti e i dati sperimentali. Sebbene il valore del REQM sia pari a 5 W/m^2 e quindi per valori di flusso termico totale tra i -40 e 80 W/m^2 possa considerarsi un buon risultato, in realtà analizzando la distribuzione dei risultati si può notare che una larga parte dei dati non ricadono all'interno dell'intervallo $\pm 2\sigma$, a differenza di quanto accadeva per la tecnologia di riferimento. I risultati sono dunque caratterizzati da una grande dispersione dei residui e quindi da una scarsa validità della relazione tra i dati misurati e quelli simulati. Dal confronto delle energie totali si può notare che i dati calcolati sono confrontabili con quelli della sperimentazione e all'interno dell'intervallo $\pm 2\sigma$, ma il valore di REQM è pari a 80 Wh/m^2 , e si trova nello stesso ordine di grandezza dei valori di energia totale calcolati (tra i -400 e $+300 \text{ Wh/m}^2$). Si può notare che il migliore risultato si ottiene per valori di energia negativa, calcolati durante giornate prive di radiazione solare quando le dispersioni termiche sono superiori rispetto agli apporti solari. Per valori di energia giornaliera positivi la correlazione tra i dati misurati

Tabella 9.6: I valori dei coefficienti β calcolati con l'equazione dei flussi termici totali (RLM1).

$\dot{q}_{tot} = \beta \cdot I_{out} + \beta' \cdot (t_{out} - t_{in}) + \beta_0$				
		Inverno	Mezza stagione	Estate
β_0	W/m^2	-1,039	3,461	3,79
β	-	0,079	0,074	0,06
β'	W/m^2K	0,560	0,788	0,81
REQM			7,6	W/m^2
$\dot{q}_{tot} = \beta \cdot I_{out} + \beta' \cdot (t_{out} - t_{in})$				
β	-	0,079	0,077	0,075
β'	W/m^2K	0,615	0,534	0,399
REQM			7,8	W/m^2

e modellati peggiora. Probabilmente durante il giorno il peso del fattore solare equivalente g^* è maggiore e l'incertezza con cui è stato determinato (valori R^2 non soddisfacenti) determina la scarsa relazione tra dati misurati e modellati.

Elaborazione dei dati sperimentali con il metodo della regressione multiple La stessa metodologia è stata applicata per valutare i parametri con il metodo delle Regressioni Lineari Multiple secondo quanto indicato in 6.1.3. Il metodo è stato applicato solo alla facciata attiva e non al tecnologia di riferimento. I risultati del primo e del secondo modello sono presentati nell'articolo [46], mentre il terzo modello è stato sviluppato durante la scrittura del lavoro di tesi. Per tutti e tre i modelli sono stati calcolati i parametri di regressione con il termine noto e ponendo il termine noto pari a zero.

Il primo modello con RLM I coefficienti β sono calcolati dall'elaborazione dei dati sperimentali (SET 1) della facciata attiva con il metodo delle RLM tramite l'equazione 6.26. In tabella 9.6 e 9.7 sono riportati i risultati dei coefficienti calcolati con il primo metodo.

Il secondo modello con RLM I coefficienti γ sono calcolati dall'elaborazione dei dati sperimentali (SET 1) della facciata attiva con il metodo delle RLM tramite l'equazione 6.28. In tabella 9.8 e 9.9 sono riportati i risultati dei coefficienti calcolati con il secondo metodo.

Il terzo modello con RLM Il terzo modello è stato applicato al SET 1 per calcolare i coefficienti δ . Si noti che i valori di energia e di flusso termico differiscono rispetto a quelli degli altri modelli perché in questo caso non sono specifici (al metro quadro), ma sono moltiplicati per l'area della facciata climatica di $12,62 m^2$, secondo l'equazione 6.30. I risultati delle simulazioni sono stati riportati solo per le equazioni con il termine noto pari a zero, in quanto con il

Tabella 9.7: I valori dei coefficienti β_{24} calcolati con l'equazione delle energie totali giornaliere (RLM1).

$E_{tot24} = \beta_{(24)} \cdot H_{out} + \beta'_{(24)} \cdot \Delta t_{(24)} + \beta_{0(24)}$				
		Inverno	Mezza stagione	Estate
$\beta_{0(24)}$	Wh/m^2	-46,51	-1,35	-27,36
$\beta_{(24)}$	-	0,10	0,09	0,09
$\beta'_{(24)}$	$W/m^2 K$	0,63	0,64	0,31
REQM			61,3	Wh/m^2
$E_{tot24} = \beta_{(24)} \cdot H_{out} + \beta'_{(24)} \cdot \Delta t_{(24)}$				
$\beta_{(24)}$	-	0,01	0,09	0,09
$\beta'_{(24)}$	$W/m^2 K$	0,74	0,64	0,35
REQM			61,5	Wh/m^2

Tabella 9.8: I valori dei coefficienti γ calcolati con l'equazione dei flussi termici totali (RLM2).

$\dot{q}_{tot} = \gamma \cdot I_{out} + \gamma' \cdot (t_{out} - t_{cav}) + \gamma'' \cdot (t_{cav} - t_{in}) + \gamma_0$				
		Inverno	Mezza stagione	Estate
γ_0	W/m^2	-3,09	4,83	3,24
γ	-	0,06	0,04	0,04
γ'	$W/m^2 K$	-0,26	-0,25	0,12
γ''	$W/m^2 K$	0,87	1,59	1,45
REQM			7,0	W/m^2
$\dot{q}_{tot} = \gamma \cdot I_{out} + \gamma' \cdot (t_{out} - t_{cav}) + \gamma'' \cdot (t_{cav} - t_{in})$				
γ	-	0,06	0,05	0,06
γ'	$W/m^2 K$	-0,01	-0,51	-0,25
γ''	$W/m^2 K$	0,98	1,18	1,14
REQM			7,3	W/m^2

Tabella 9.9: I valori dei coefficienti $\gamma_{(24)}$ calcolati con l'equazione delle energie totali giornaliere (RLM2).

$E_{tot24} = \gamma_{(24)} \cdot H_{out} + \gamma'_{(24)} \cdot \Delta t^{o-c} + \gamma''_{(24)} \cdot \Delta t^{c-i} + \gamma_{o(24)}$				
		Inverno	Mezza stagione	Estate
$\gamma_{0(24)}$	Wh/m^2	-16,85	53,78	5,42
$\gamma_{(24)}$	-	0,13	0,06	0,07
$\gamma'_{(24)}$	$W/m^2 K$	2,00	-0,18	0,04
$\gamma''_{(24)}$	$W/m^2 K$	-0,03	1,41	0,87
REQM			59,6	Wh/m^2
$E_{tot24} = \gamma_{(24)} \cdot H_{out} + \gamma'_{(24)} \cdot \Delta t^{o-c} + \gamma''_{(24)} \cdot \Delta t^{c-i}$				
$\gamma_{(24)}$	-	0,014	0,07	0,07
$\gamma'_{(24)}$	$W/m^2 K$	2,07	-0,17	0,03
$\gamma''_{(24)}$	$W/m^2 K$	0,00	1,19	0,86
REQM			58,6	Wh/m^2

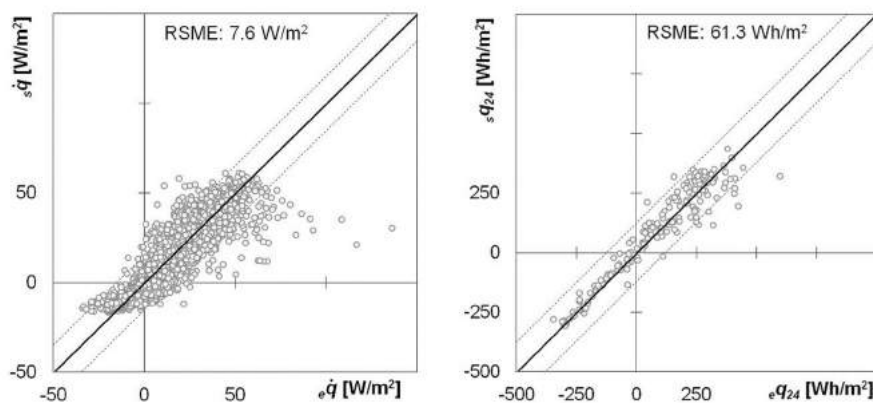


Figura 9.33: Validazione dei risultati con il primo modello RLM. Confronto tra i flussi termici totali a sinistra e le energie a destra, calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL e i valori monitorati ($\beta_0 \neq 0$).

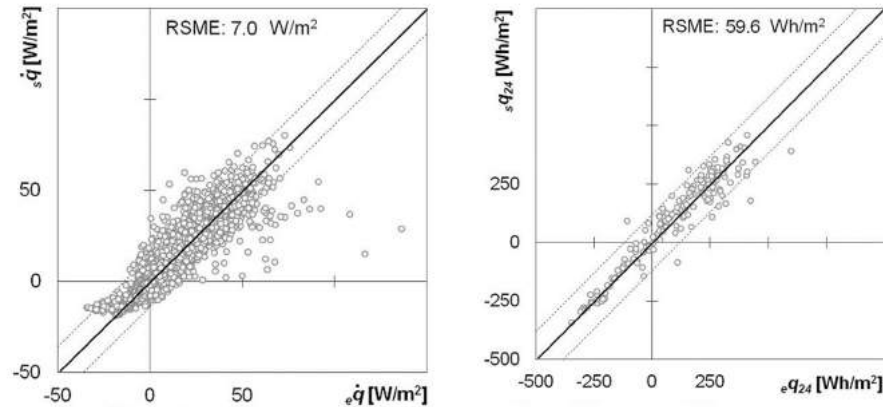


Figura 9.34: Validazione dei risultati con il secondo modello RLM. Confronto tra i flussi termici totali a sinistra e le energie a destra, calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL e i valori monitorati ($\beta_0 \neq 0$).

termine noto il modello presentava una capacità di rappresentare il comportamento della tecnologia inferiore. Per le simulazioni si è assunto il valore della portata nominale dell'aria di ventilazione pari a 0,22 kg/s.

Discussione risultati RLM Dall'analisi dei risultati emerge che i valori dei coefficienti calcolati cambiano la loro entità in maniera considerevole in funzione del modello che viene applicato. Per quasi tutti i modelli (a parte le energie con modello RLM2) se si utilizza l'equazione di regressione lineare con il termine noto il confronto tra i dati misurati e modellati migliora. Il termine noto può essere interpretato come un coefficiente dell'errore della regressione.

I risultati del modello RLM3 non possono considerarsi accettabili. Il modello non è in grado di valutare coefficienti di regressione lineare multipla corretti per modellare una FTA. La carenza di questi risultati può derivare da diversi fattori:

- si è verificato che gli errori principali compiuti dal modello sono nella modellazione della prestazione delle facciate durante il giorno. In particolare dall'analisi del grafico delle energie in figura 9.35 si può notare che i valori di energia negativa sono simulati in modo corretto dal modello, mentre i valori positivi sono molto dispersi lungo la retta di correlazione.
- la portata d'aria in intercapedine è stata assunta costante durante tutta la giornata e pari a zero la notte quando l'impianto è spento. Si è tentato di modulare la portata d'aria durante il giorno in funzione dei dati letti dall'anemometro (strumento che fornisce un valore puntuale della velocità dell'aria), ma non si sono rilevati dei miglioramenti nella simulazione.

L'interpretazione fisico tecnica del significato dei coefficienti di regressione lineari calcolati non è tra gli scopi della ricerca. Lo scopo è verificare se le equazioni alla base del metodo RLM siano in grado di caratterizzare il comportamento del sistema di facciata attivo. In generale è possibile notare che i valori più bassi di REQM si sono calcolati con il termine noto diverso da zero. Inoltre è possibile notare che i risultati migliori si sono ottenuti calcolando il valore di energia

Tabella 9.10: I valori dei coefficienti δ calcolati con l'equazione dei flussi termici totali e delle energie totali (RLM3).

$\dot{q}_{tot} + \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{inlet} - t_{exh}) = \delta \cdot I_{out} \cdot A + \delta' \cdot (t_{out} - t_{in}) \cdot A$				
		Inverno	Mezza stagione	Estate
δ	—	0,48	0,42	0,37
δ'	W/m^2K	0,56	-0,31	1,33
REQM			523,9	W
$E_{tot24} = \delta_{(24)} \cdot H_{out} \cdot A + \delta'_{(24)} \cdot \Delta t^{o-i} \cdot A - \int_{00:00}^{24:00} \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{inlet} - t_{exh})$				
$\delta_{(24)}$	—	0,55	0,45	0,46
$\delta'_{(24)}$	W/m^2K	1,02	-1,21	1,47
REQM			4162,6	Wh

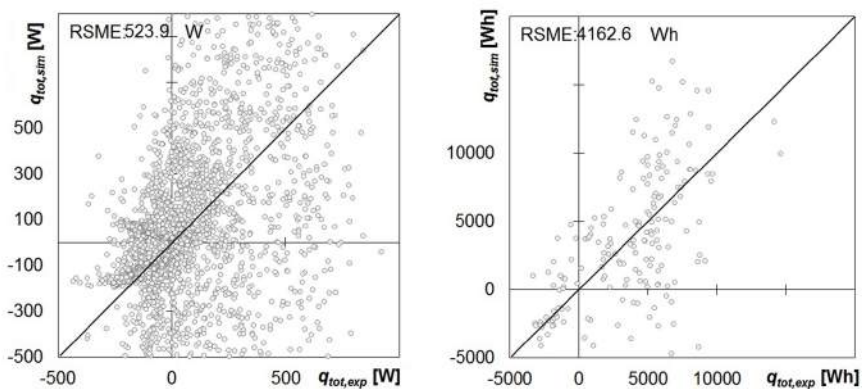


Figura 9.35: Validazione dei risultati con il terzo modello RLM. Confronto tra i flussi termici totali a sinistra e le energie a destra, calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL e i valori monitorati

giornaliera piuttosto che il flusso termico totale. Questo risultato può essere spiegato considerando che gli effetti inerziali e capacitivi del sistema di facciata sono maggiormente rilevanti nel calcolo del flusso termico, mentre vengono compensati nel calcolo delle energie. Il modello avanzato (RLM2) è in grado di portare alla determinazione di coefficienti che simulano il comportamento della facciata in modo più vicino ai dati sperimentali. Da un'analisi più approfondita emerge che nell'applicazione di entrambi i modelli i maggiori errori si compiono durante la giornata mentre quando i flussi termici o le energie sono negative i valori simulati sono maggiormente vicini a quelli monitorati. Nel periodo invernale il valore di REQ_M è circa 20 Wh/m^2 mentre il valore annuale è pari a 60 Wh/m^2 . Da questo dato è confermato che la stagione più critica è l'estate e la mezza stagione. Questo significa che i coefficienti di regressione calcolati non sono rappresentativi del comportamento estivo della tecnologia. Rispetto al modello con RL i modelli con RLM sembrano implementare leggermente la loro capacità di rappresentare il fenomeno.

9.3.4 CSb-Valutazione del comfort ambientale

Il comfort termico I risultati delle analisi di comfort termico non sono riportati integralmente, ma i principali risultati sono sintetizzati:

- Durante le giornate estive la facciata di riferimento R-CSb in assenza dello schermo esterno presenta condizioni di discomfort termico in prossimità della facciata.
- Le principali cause delle condizioni di discomfort per la facciata CSb nel periodo estivo, derivano dalla regolazione dell'aria negli ambienti e non dalla tecnologia di facciata. Infatti ipotizzando che l'impianto mantenga la temperatura dell'aria a 26°C , non si calcolano condizioni di discomfort.
- Nel periodo invernale in assenza e in presenza di radiazione solare diretta non si sono rilevate condizioni di discomfort per la facciata CSb e R-CSb
- Le condizioni di comfort termico sono garantite per le due facciate durante la mezza stagione, con schermature screen ON.

Nel paragrafo si riportano i risultati:

- giornata estiva screen OFF,
- giornata estiva screen ON.

Giornata estiva screen OFF per CSb e R-CSb, PMV vs energie

Nell'immagine 9.36 si sono confrontati i valori di PMV e di energia calcolati per la facciata attiva al piano terra, al primo piano e per la facciata passiva durante una giornata soleggiata con screen OFF sia per la facciata attiva che passiva. Dal confronto risulta chiaro che la facciata passiva in una giornata soleggiata estiva ha delle prestazioni inferiori rispetto alla facciata attiva. Si arriva a questa considerazione valutando l'andamento del PMV nella giornata. Si rilevano condizioni di discomfort anche al piano terra della facciata attiva. La migliore prestazione si registra nella facciata al piano primo. Infatti i valori di PMV sono più vicini alla condizione di comfort ottimale (zero), ma le energie

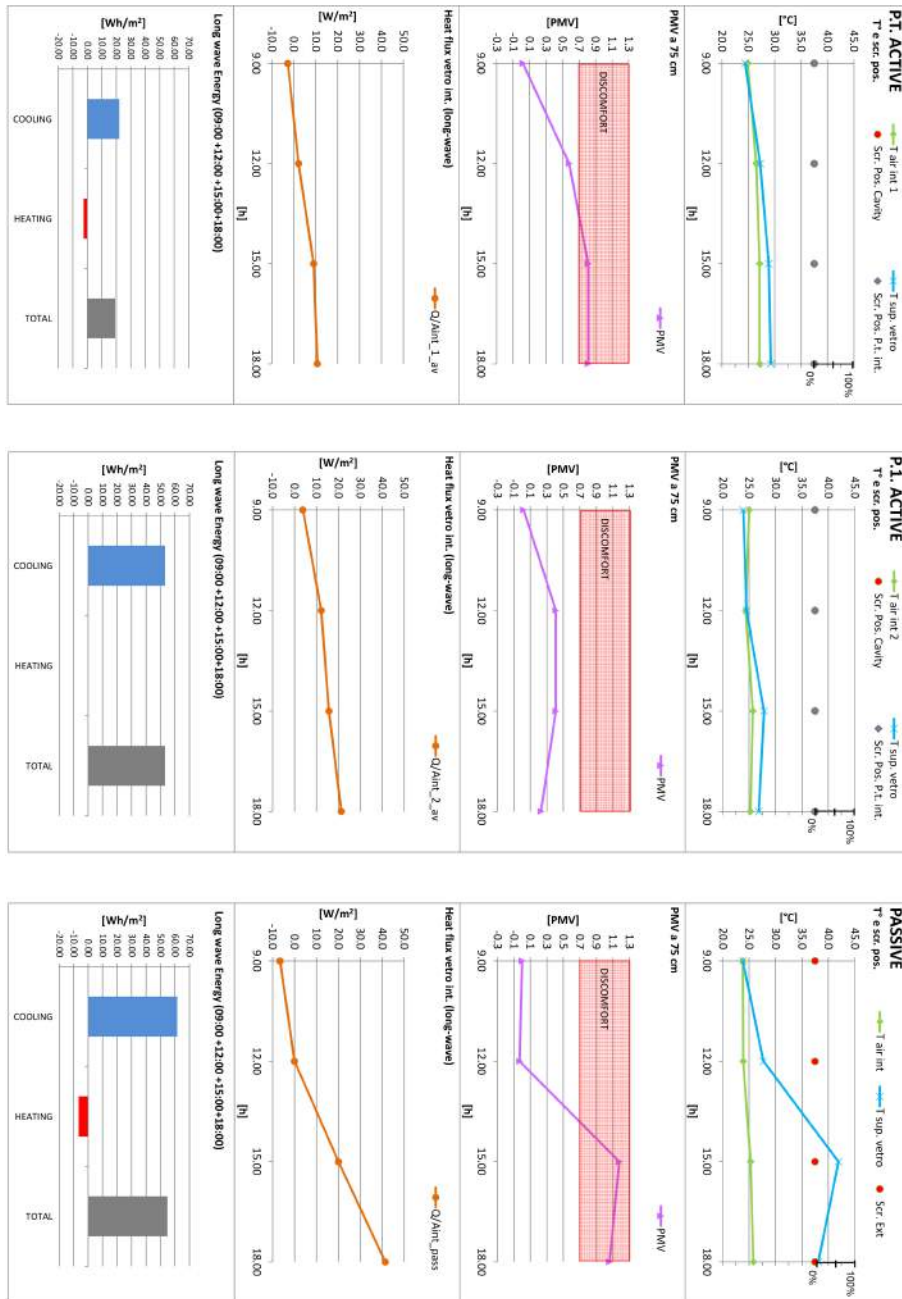


Figura 9.36: Energie e analisi PMV calcolato a 75 cm dalle facciate CSb, piano terra e primo e R-CSb, screen OFF (26/09/11).

calcolate sono superiori rispetto a quelle delle facciata al primo piano.

Giornata estiva screen ON per CSb e R-CSb, PMV vs energie

Nessuna delle tre tecnologie analizzate presenta condizioni di discomfort. Le considerazioni fatte per la configurazione screen OFF sono valide anche per questa configurazione. Dall'analisi delle temperature superficiali del vetro interno si rileva che la temperatura superficiale maggiore si misura sulla facciata R-CSb, ma i valori di PMV più elevati si calcolano per la facciata CSb al piano terra. Questo è dovuto al fatto che la temperatura all'interno degli ambienti non è perfettamente confrontabile. Nell'ufficio dietro alla facciata passiva le prestazioni di comfort sono migliorate dall'utilizzo della tenda esterna, che limita il surriscaldamento della superficie vetrata.

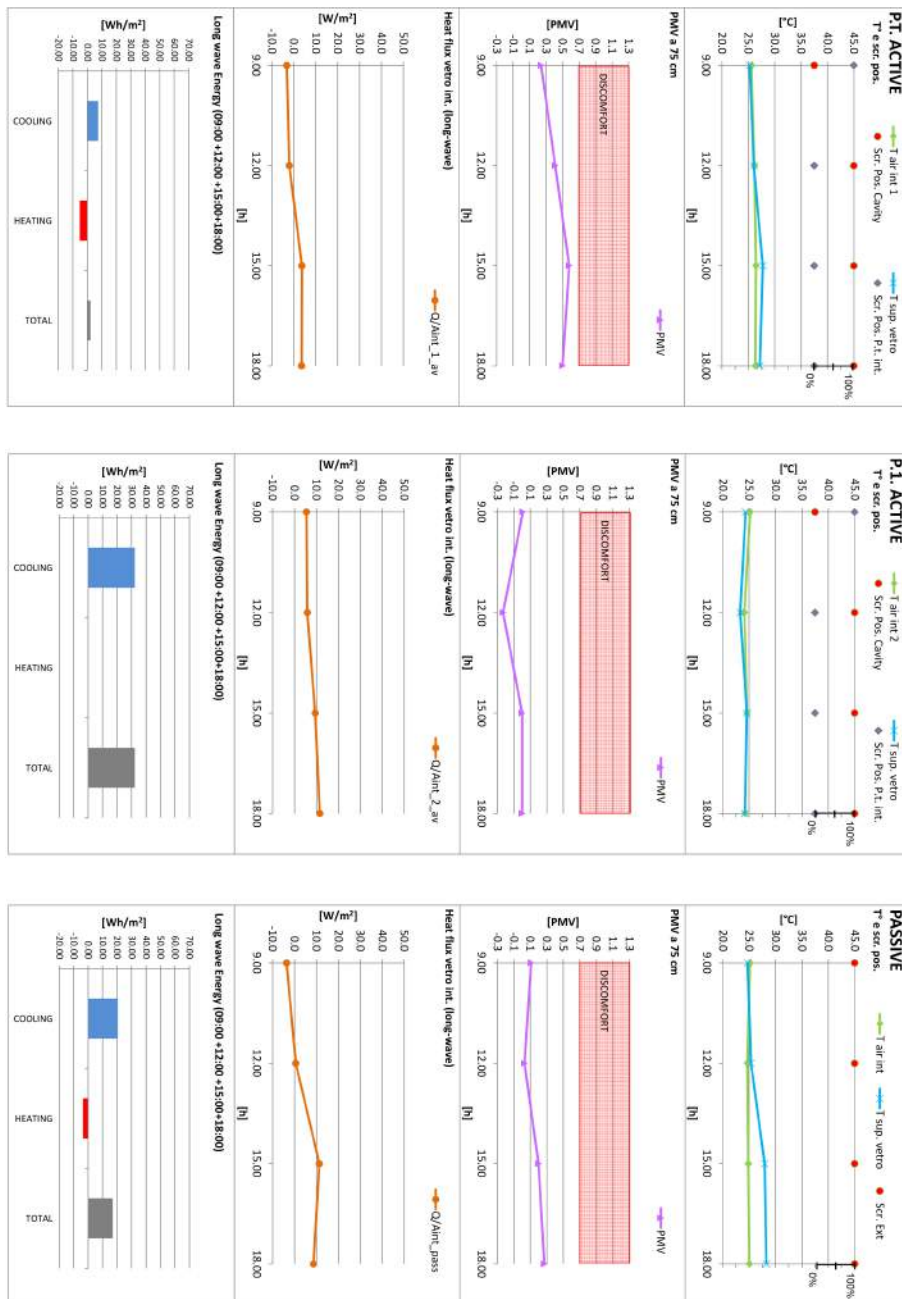


Figura 9.37: Energie e analisi PMV calcolato a 75 cm dalle facciate CSb, piano terra e primo e R-CSb, screen ON, (30/06/11).

Sintesi risultati CSb:

- ◇ La facciata CSb e il suo riferimento sono stati caratterizzati con i parametri sintetici di τ_l , τ_s , U^* , $TSET^*$.
- I flussi termici che attraversano la facciata CSb durante una giornata estiva sono sempre superiori di quelli attraverso il riferimento R-CSb con schermatura esterna.
- + Il risparmio energetico, per unità di superficie di facciata, misurato per la facciata CSb rispetto al riferimento è di circa il 40% nel periodo invernale e 48% nel periodo estivo.
- ◇ La differenza in termini di energia tra le due tecnologie in primavera non è rilevante.
- + I parametri prestazionali calcolati con il metodo delle RL sono rappresentativi del comportamento della tecnologia di riferimento.
- L'impiego di parametri prestazionali sintetici calcolati con il metodo delle RL per facciate climatiche non permette di predire in modo accurato il comportamento fisico tecnico della tecnologia e può portare ad errori sostanziali nel calcolo delle energie giornaliere.
- + L'impiego della tecnica delle RLM permette di migliorare leggermente i risultati rispetto alle RL.
- Il modello RLM3 non è in grado di modellare la facciata climatica Csb in modo corretto.
- I coefficienti calcolati con il metodo delle RLM non sono pienamente in grado di caratterizzare il comportamento del sistema di facciata, infatti per più del 50% del tempo il flusso termico o le energie sono superiori di più del 20%.
- + Non si sono calcolate condizioni di discomfort per la facciata CSb con valori di temperatura dell'aria interna regolati correttamente.
- Con screen OFF R-CSb presenta condizioni di discomfort termico.

9.4 CSc-La facciata climatica Coopsette

Il paragrafo contiene dati coperti da accordo di riservatezza, le pagine da 173 a pagina 192 non sono state riportate, contratto di riferimento “Monitoraggio e analisi sperimentale delle prestazioni termo-energetiche Coopsette ” numero 1035/2012, codice progetto 56_ *RCE12SEV01*, referente scientifico prof. V. Serra.

Capitolo 10

Applicazione e validazione del modello di calcolo proposto

Nel capitolo è presentata la validazione del modello di calcolo *MATS* Modelling Active Transparent Systems, descritto nel capitolo 7. I dati sperimentali utilizzati per la validazione sono quelli delle facciate climatiche CSa e CSc presentati nei paragrafi 8.2.1 e 8.2.3.

Nel paragrafo 10.2, si sono confrontati i risultati del modello MATS con i risultati ottenuti con un modello dettagliato (F.Zanghirella [96]).

Il capitolo è articolato in tre parti:

- VALIDAZIONE 1 \rightarrow CSa
- VALIDAZIONE 2 \rightarrow CSa+CSc(A)
- CONFRONTO con modello avanzato di F.Zanghirella [96] \rightarrow CSa

10.1 La validazione del modello con dati sperimentali

Il processo di validazione è diviso in due fasi:

1. la prima dove si sono utilizzati dati di input disponibili dal progettista in fase preliminare,
2. la seconda in cui si è verificato se l'accuratezza delle simulazioni poteva migliorare modificando alcuni dati di input.

La prima validazione è stata effettuata sulla facciata CSa, mentre la seconda sul caso studio CSa e CSc(A). Nella prima validazione si sono utilizzati i valori della temperatura dell'aria inlet in intercapedine uguali a quelli dell'aria interna, mentre per la seconda validazione si sono utilizzate le temperature dell'aria inlet misurate durante le campagne sperimentali. Infatti si è verificato che i dati di temperatura inlet rilevati sono differenti da quelli di temperatura dell'aria interna per l'effetto del telaio della facciata, come già rilevato da *D. Saelens et al.* [82]. Non essendo un dato disponibile in fase di progettazione preliminare, si sono prima verificati i risultati con l'ipotesi semplificativa di temperatura

dell'aria inlet uguale a quella dell'aria ambiente nella validazione 1 e poi nella validazione 2 si è inserito come dato di input la temperatura inlet misurata.

Durante il monitoraggio si sono rilevate le temperature e i flussi termici superficiali a tre diversi livelli di misura sia per CSa che per CSc, al fine di determinare gli effetti di stratificazione dell'aria. Il modello MATS simula una temperatura per ogni nodo, il confronto con i dati misurati è stato effettuato tra il valore medio calcolato dalla media delle tre letture ai tre livelli. La stessa metodologia è stata applicata per confrontare i flussi termici superficiali.

Per effettuare il confronto si sono utilizzati:

- la radice quadrata dell'errore quadratico medio REQM,
- la radice quadrata dell'errore quadratico medio percentuale REQMP,
- la differenza assoluta media $|\Delta|_m$,
- la deviazione standard STD.

I parametri di analisi statistica sono definiti in appendice 11.2.

Validazione 1, CSa. Si sono scelte due giornate consecutive durante la mezza stagione, nel mese di ottobre, con elevati valori di irraggiamento solare, per effettuare la validazione del modello con il caso studio CSa¹. La validazione 1 ha infatti lo scopo di verificare il funzionamento del modello con i dati disponibili dal progettista in fase di progetto preliminare, motivo per cui si è assunto che la $t_{inlet} = t_{airint}$.

I dati di input per la validazione del modello sono stati:

- il profilo orario delle condizioni al contorno, temperatura dell'aria esterna, interna e radiazione solare incidente sulla facciata rappresentati in figura 10.1,
- la portata d'aria in intercapedine, $\dot{m}=56 \text{ m}^3/h$,
- le dimensioni della facciata, $h=2,4$ per $l=1,3 \text{ m}$,
- l'altitudine, $a=239 \text{ m}$ e la longitudine $L=7^\circ,65$,
- l'esposizione sud (0°),
- il coefficiente di scambio termico liminare interno, $h_i=8 \text{ W/m}^2K$,
- il coefficiente di scambio termico liminare esterno, $h_e=14 \text{ W/m}^2K$,
- le proprietà delle lastre e della tenda riportate in tabella 10.1,
- la temperatura dell'aria in ingresso in intercapedine è stata posta pari alla temperatura dell'aria interna.

Gli output I risultati del modello sono stati confrontati con i dati misurati. In particolare si sono riportati i risultati:

¹Le giornate scelte sono le stesse utilizzate per la validazione del modello di F.Zanghirella 08/10/05 e 09/10/05 [96].

Tabella 10.1: Proprietà dei vetri e tenda della facciata CSa. Con \parallel si indica il vetro, con \sim la tenda.

	\parallel	aria	\parallel	aria	\sim	aria	\parallel
spessore [mm]	8	15	6	70	-	70	6
τ_s [-]	0,72	-	0,81	-	0,24	-	0,81
ρ_s [-]	0,07	-	0,07	-	0,50	-	0,07
ε_i [-]	0,84	-	0,84	-	0,60	-	0,84
ε_e [-]	0,84	-	0,84	-	0,60	-	0,84

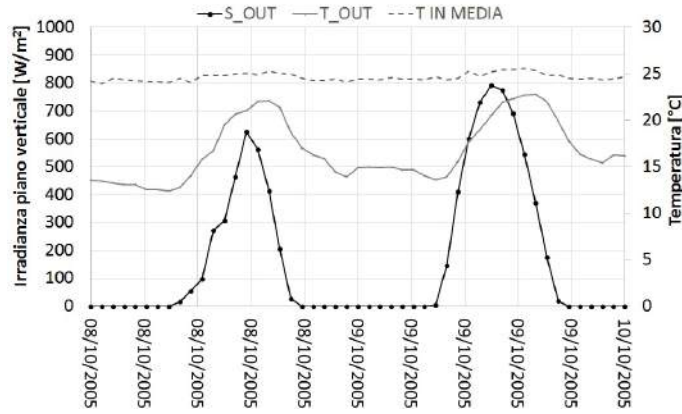


Figura 10.1: Condizioni al contorno delle due giornate utilizzate per la validazione, CSa.

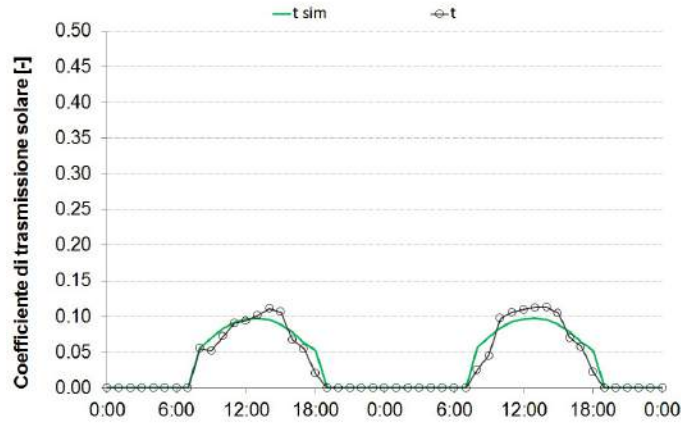
- del coefficiente di trasmissione solare τ_s in figura 10.2,
- delle temperature del nodo verso l'interno t_4 , in figura 10.3,
- delle temperature del nodo verso l'esterno t_1 , in figura 10.4,
- della temperatura della schermatura t_3 , in figura 10.5,
- della temperatura dell'aria nell'intercapedine t_{gap} , in figura 10.6,
- dei flussi termici \dot{q}_i , in figura 10.7.

Coefficiente di trasmissione solare L'andamento del coefficiente di trasmissione solare simulato è confrontabile con i dati misurati durante le due giornate analizzate (vedi figura 10.2). Questo dato indica che il modello è in grado di simulare correttamente la radiazione solare trasmessa attraverso la facciata e che i dati di input delle proprietà solari dei diversi elementi che compongono la facciata, vetri e schermature, sono corretti. In tabella 10.2 sono riportati i parametri statistici di confronto. Il valore modellato si discosta rispetto al valore misurato con una differenza media assoluta di 0,014 e un REQM di 0,017, nell'ordine dell'incertezza di misura della radiazione solare trasmessa attraverso

Tabella 10.2: Confronto tra dati misurati e modellati CSa, τ_s, t_n, \dot{q} .

	REQM	REQMP	$ \Delta _m$	STD
	-	%	-	-
τ_s	0,017	9	0,014	0,009
	REQM	REQMP	$ \Delta _m$	STD
	$^{\circ}\text{C}$	%	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
$t1$	2,3	9	1,7	1,7
$t3$	3,6	11	2,8	2,3
$t4$	1,8	7	1,5	1,0
t_{gap3}	1,9	7	1,8	0,7
	REQM	REQMP	$ \Delta _m$	STD
	W/m^2	%	W/m^2	W/m^2
\dot{q}	10,5	-	7,1	7,8

la facciata (vedi paragrafo 6.9). Infatti i dati misurati possono essere affetti da errori di misura dovuti all'angolo di incidenza della radiazione solare sul sensore.

Figura 10.2: Coefficiente di trasmissione solare τ_s , confronto tra dati misurati e modellati, CSa.

Temperature Il confronto tra le temperature è stato effettuato per le superficiali interne ed esterne riportate in figura 10.3 e per la temperatura della schermatura in figura 10.5.

La temperatura superficiale esterna ($t1$) è calcolata correttamente dal modello, durante il giorno i valori misurati sono sfasati di circa un'ora in avanti per entrambe le giornate analizzate. Infatti il valore di picco dei dati misurati è alle ore 15.00 mentre per i dati modellati alle 14.00. Il valore della radice dell'errore

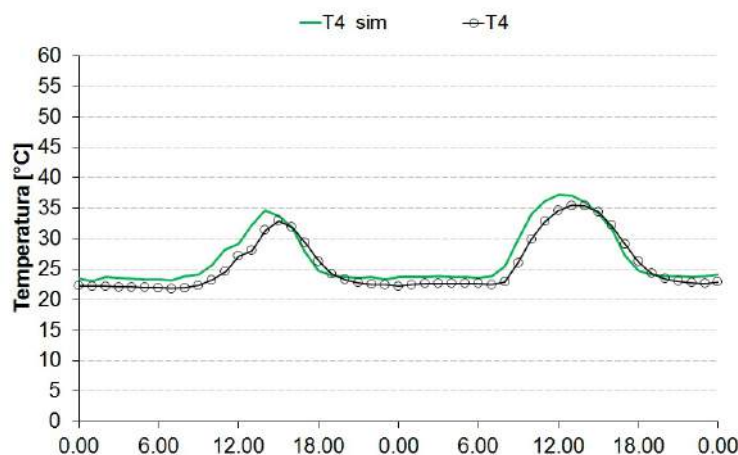


Figura 10.3: Temperatura superficiale interna t_4 , dati misurati e simulati, CSa.

quadratico medio REQM è pari a 2,3 °C, REQMP del 9% la differenza media assoluta $|\Delta_m|$ di 1,7 °C e STD di 1,7 °C.

La temperatura superficiale interna (t_4) presenta il valore di REQM più basso pari a 1,8°C. Il modello simula l'andamento in modo corretto ma tende a sovrastimare i valori di temperatura superficiale interna (vedi tabella 10.2).

Il valore modellato per la temperatura della schermatura (t_3) presenta la maggiore differenza rispetto ai dati misurati e si è calcolato un valore di REQM di 3,6 °C, REQMP del 11% la differenza media assoluta $|\Delta_m|$ di 2,8 °C e STD di 2,3°C. Il modello tende a sovrastimare i valori della schermatura, anche di notte i dati modellati sono leggermente maggiori di quelli misurati.

Infine si sono analizzate le temperatura dell'aria in intercapedine ($tgap3$). Il confronto è stato effettuato con i valori rilevati e modellati dell'intercapedine ventilata verso l'interno. Si è scelto di confrontare i dati di questa intercapedine perché i valori monitorati sono influenzati in maniera minore dalla radiazione solare incidente, in quanto il sensore oltre a essere protetto da un cilindro schermante si trova dietro la tenda. Il modello tende a calcolare in modo corretto la temperatura dell'aria in intercapedine. Di notte i valori calcolati sono leggermente superiori mentre di giorno i valori di picco sono inferiori a quelli misurati. Anche per questa temperatura i dati modellati durante il giorno presentano uno sfasamento rispetto ai dati misurati. Il valore calcolato di REQM è pari a 1,9 °C, REQMP del 7% la differenza media assoluta $|\Delta_m|$ di 1,8 °C e STD di 0,7°C. Considerando l'incertezza della misura di temperatura con le termocoppie $\pm 0,5$ °C, i risultati ottenuti possono ritenersi soddisfacenti per t_1 , t_4 e $tgap3$ e accettabili per t_3 .

Flussi termici superficiali Il confronto tra i flussi termici superficiali è stato effettuato tra il valore medio dei tre livelli di misura e il flusso modellato (vedi figura 10.7). Durante la notte i flussi termici modellati sono confrontabili con i dati misurati, quindi la resistenza termica del sistema è implementata e calcolata in modo corretto dal modello. Durante il giorno in presenza di radiazione solare i dati simulati sono maggiori di quelli monitorati. Si rileva che l'andamento dei flussi modellati è confrontabile con l'andamento della radiazione

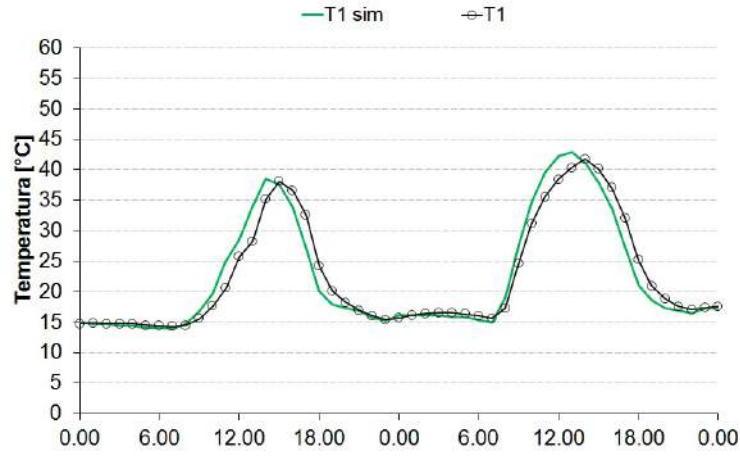


Figura 10.4: Temperatura superficiale esterna t_1 , dati misurati e simulati, CSa.

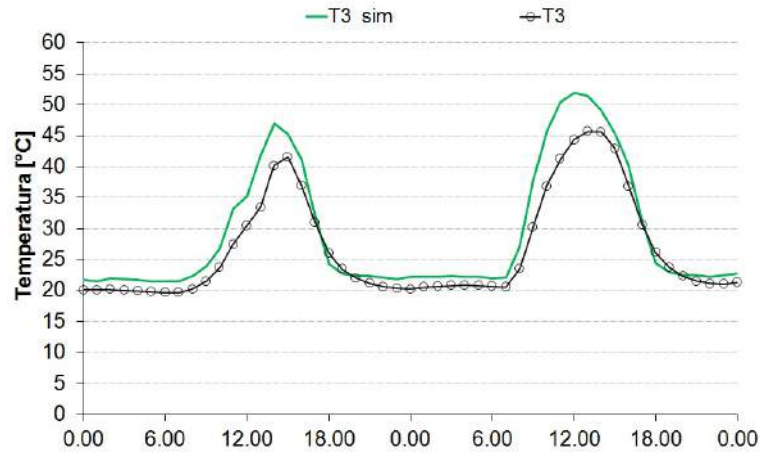


Figura 10.5: Temperatura della schermatura t_3 , dati misurati e simulati, CSa.

solare, mentre i dati misurati sono leggermente attenuati e sfasati. Così come per le temperature, il picco di flusso termico misurato è alle 15:00, mentre quello modellato è alle 14:00. Si è calcolato un valore² di REQM di $10,5 \text{ W/m}^2$, con valori di flusso termico superficiale misurato che variano tra i -8 W/m^2 e i $+57 \text{ W/m}^2$. La differenza media assoluta è di $|\Delta_m|$ di $7,1 \text{ W/m}^2$, e la STD di $7,8 \text{ W/m}^2$.

²Il valore di REQMP non è stato calcolato per i flussi termici, in quanto l'indice non è in grado di definire l'affidabilità del modello. Per valori di flusso termico intorno alle zero si calcolano valori di REQMP molto elevati anche se i dati misurati e modellati sono confrontabili [96].

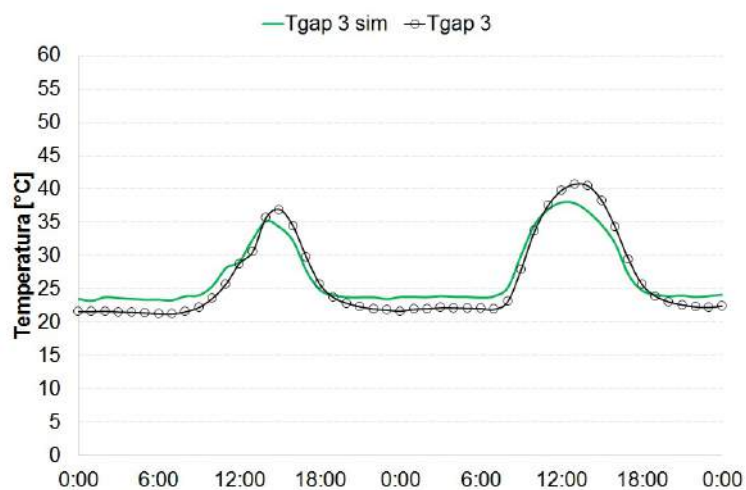


Figura 10.6: Temperatura dell'aria in intercapedine *tgap3* (lato interno), dati misurati e simulati, CSa.

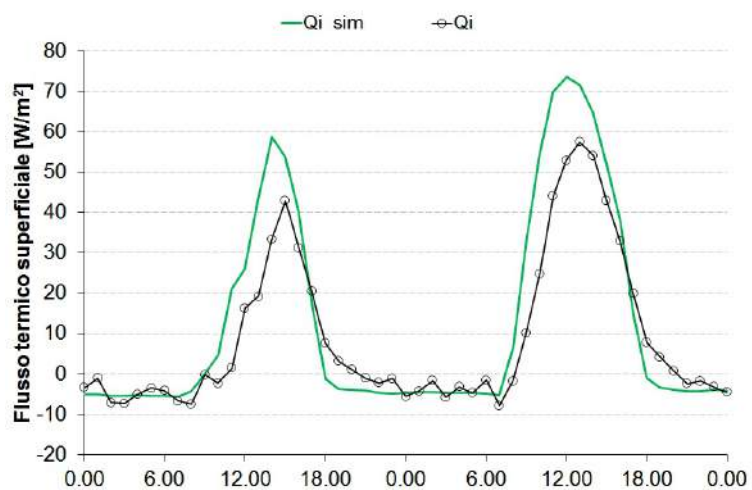


Figura 10.7: Flussi termici superficiali, dati misurati e simulati, CSa.

Sintesi risultati validazione 1, CSa:

- ◇ Il modello MATS tende a sovrastimare i valori di temperatura e i flussi termici superficiali.
- + Considerando l'incertezza della misura di temperatura con le termocoppie $\pm 0,5$ °C, i risultati ottenuti possono ritenersi accurati per $t1$, $t4$ e $tgap3$.
- Il modello tende a sovrastimare la temperatura della schermatura $t3$ in presenza di radiazione solare.
- I flussi termici superficiali in presenza di radiazione solare sono sovrastimati rispetto ai dati misurati ($REQM = 10,5 \text{ W/m}^2$).
- ◇ Il modello può considerarsi validato e può ritenersi adatto a simulazioni in fase preliminare con dati di input reperibili da schede tecniche.

Validazione 2, CSa + CSc. Nella seconda validazione si sono utilizzate le temperature dell'aria inlet misurate durante le campagne sperimentali. Si sono presentati solo i risultati della facciata A del caso studio CSc, perché quelli della B non presentavano risultati confrontabili con quelli misurati.

Validazione 2, CSa I calcoli sono stati rilanciati per il CSa, mantenendo invariati i dati di input riportati nell'elenco puntato del paragrafo 10.1 per le stesse giornate di mezza stagione. I risultati della validazione 2, sono migliorati per quel che riguarda la valutazione della temperatura dell'aria in intercapedine rispetto a quelli della validazione 1, mentre per tutte le altre grandezze i risultati sono peggiori. La temperatura dell'aria in intercapedine mostra un valore di REQM pari a 1,0 °C inferiore rispetto al valore di 1,9 °C della validazione 1. I flussi termici superficiali modellati con questa validazione mostrano il maggiore incremento in termini di REQM passando da 10,5 W/m^2 a 13,2 W/m^2 . I risultati di questa simulazione sono stati utilizzati per effettuare il confronto con il modello di F. Zanghirella nel paragrafo 10.2. Il confronto è stato effettuato con la validazione 2, per mettersi nelle stesse condizioni di simulazione del modello avanzato.

Validazione 2, CSc Il paragrafo contiene dati coperti da accordo di riservatezza, le pagine da 131 a pagina 138 non sono state riportate, contratto di riferimento "Monitoraggio e analisi sperimentale delle prestazioni termo-energetiche Coopsette" numero 1035/2012, codice progetto 56_RCE12SEV01, referente scientifico prof. V. Serra.

10.2 Confronto tra i risultati del modello semplificato e di un modello avanzato

I risultati del modello MATS sono stati confrontati con quelli del modello avanzato di *F. Zanghirella* [96], [95] (descritto nel paragrafo 4.2.2). Il modello avanzato è di tipo zonale a due dimensioni, a parametri concentrati e permette di simulare la prestazione di sistemi di FTA con un metodo di calcolo dettagliato. Le principali differenze rispetto a MATS sono che il modello avanzato effettua simulazioni dinamiche e ogni strato della facciata modellata oltre che possedere una resistenza termica è caratterizzato da un valore di capacità termica. Nei grafici i risultati di MATS sono in verde e indicati come *sim1* mentre i risultati del modello di *F. Zanghirella* sono indicati come *sim2* in azzurro. In nero si è riportato il valore sperimentale, derivante dalla media delle letture ai tre livelli di misura. Si è effettuato il confronto con il parametro REQM.

CSa Per effettuare il confronto tra i due modelli si sono utilizzate le stesse condizioni al contorno e le medesime ipotesi di simulazione rappresentate in figura 10.1. I risultati di MATS sono quelli della validazione 2, dove la temperatura in ingresso in intercapedine è stata fornita come dato di input, stessa ipotesi è stata adottata da *F. Zanghirella*.

Temperature Entrambi i modelli simulano valori di temperatura superficiale esterna (t_1) confrontabili con i dati sperimentali vedi figura 10.8. Dal confronto emerge che i due modelli tendono a sovrastimare i valori di temperatura durante il giorno e che il modello avanzato sottostima la temperatura del nodo di notte, quando MATS calcola valori perfettamente confrontabili con quelli misurati. Il valore di REQM calcolato per MATS è di $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre per il modello avanzato è di $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il modello avanzato presenta valori di REQM inferiori a quelli di MATS e in particolare il primo giorno di validazione il modello avanzato simula valori di t_1 perfettamente confrontabili con quelli misurati.

Le considerazioni fatte per la t_1 valgono anche per la t_4 , il modello avanzato simula correttamente la temperatura superficiale interna sia durante la notte che il giorno. I valori modellati da MATS sono invece leggermente più alti durante il giorno. Il valore di REQM calcolato per il modello avanzato è di $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ e per MATS di $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Il modello avanzato simula la temperatura della schermatura t_3 , con valori molto vicini a quelli dei dati misurati, mentre i valori di temperatura modellati da MATS sono sovrastimati. Si è calcolato un valore di REQM di $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ per il modello avanzato e di $3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ per MATS.

I flussi termici I due modelli di calcolo presentano valori simulati di flusso termico sovrastimati rispetto a quelli monitorati. Il modello MATS presenta un andamento dei valori di flusso termico più vicino ai dati monitorati rispetto a quelli del modello avanzato, infatti il valore di REQM che si calcola è pari a $13,2\text{ W/m}^2$ per MATS e a $19,2\text{ W/m}^2$ per il modello avanzato. Nel grafico in figura 10.11 si rileva che il valore di picco simulato dal modello avanzato e capacitivo coincide con il picco misurato, mentre il modello semplificato simula il picco un'ora prima.

Tabella 10.3: Confronto tra i risultati del modello MATS (sim1) e quelli di *F. Zanghirella* (sim2) rispetto ai dati misurati CSc(A), T_n e \dot{q} .

	REQM	
	MATS (sim1)	FZ (sim2)
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
t1	2,4	1,9
t3	3,9	1,2
t4	1,9	0,8
tgap	1,0	1,0
	W/m^2	W/m^2
\dot{q}	13,2	19,2

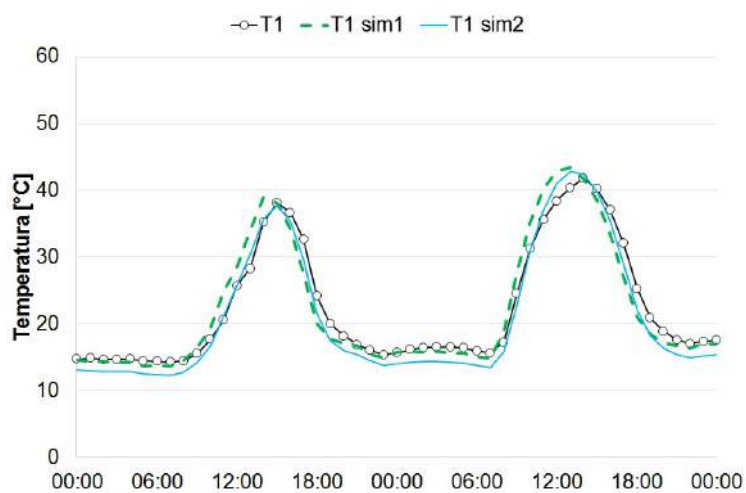


Figura 10.8: Temperatura superficiale esterna, t_1 , dati misurati e simulati, CSa. Con *sim1*=risultati MATS, con *sim2*=risultati F.Z.

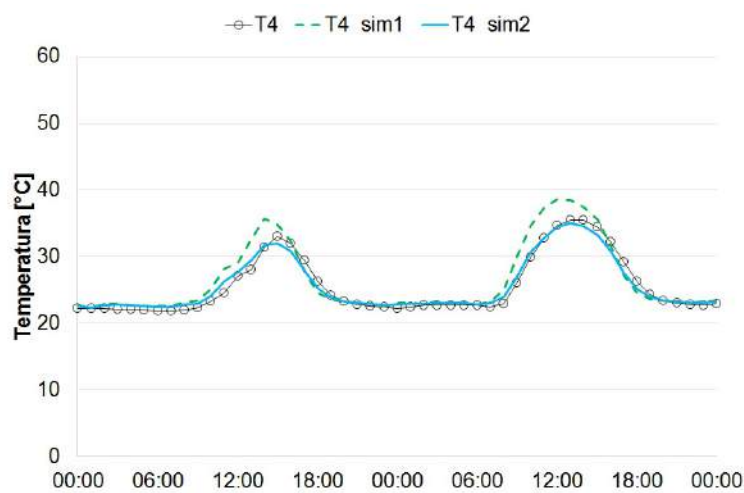


Figura 10.9: Temperatura superficiale interna, t_4 , dati misurati e simulati, CSa. Con $sim1$ =risultati MATS, con $sim2$ =risultati F.Z.

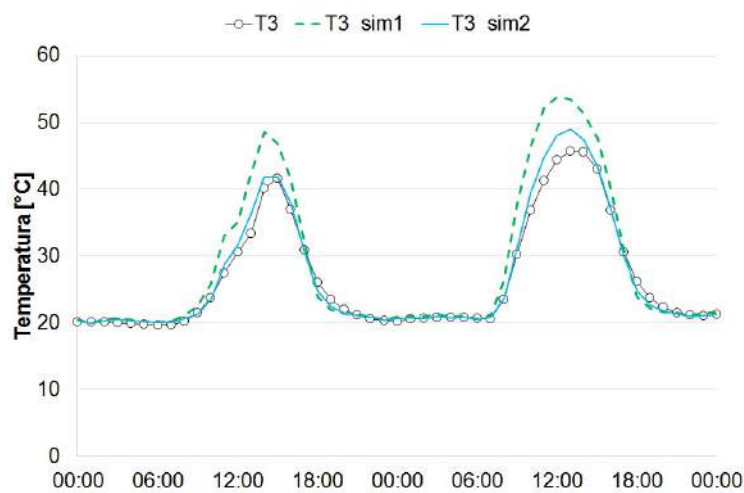


Figura 10.10: Temperatura superficiale schermo, t_3 , dati misurati e simulati, CSa. Con $sim1$ =risultati MATS, con $sim2$ =risultati F.Z.

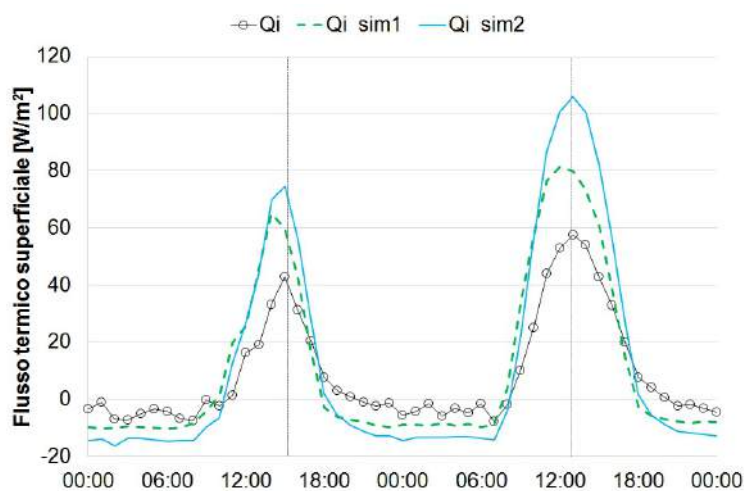


Figura 10.11: Flussi termici superficiali, dati misurati e simulati, CSa. Con *sim1*=risultati MATS, con *sim2*=risultati F.Z.

Sintesi confronto MATS vs modello avanzato CSa:

- ◇ Entrambi i modelli tendono a sovrastimare le temperature dei nodi, ma il modello avanzato tende a modellare valori delle temperature dei nodi più vicini ai dati misurati rispetto a quelle di MATS.
- + Le temperature dei nodi *t1* e *t4* sono modellate correttamente dai due modelli.
- Il modello capacitivo simula temperature della schermatura vicine a quelle dei dati misurati, mentre MATS tende a sovrastimarle.
- + Il modello MATS simula valori di flusso termico superficiale più vicini a quelli misurati rispetto al modello avanzato.
- ◇ il valore di picco simulato dal modello avanzato e capacitivo coincide con il picco misurato, mentre il modello semplificato simula il picco un'ora prima.

Capitolo 11

Conclusioni

11.1 I principali risultati della ricerca

Per il raggiungimento degli obiettivi di prestazione energetica imposti a livello europeo è in atto una trasformazione del concetto di involucro edilizio: da *elemento passivo*, a *elemento dinamico*. La ricerca sviluppata durante il dottorato ha trattato il tema dell'involucro trasparente innovativo, sia a livello di componente che come sistema edilizio. I due temi di ricerca principali di questo lavoro, sono stati individuati attraverso l'analisi bibliografica sulle tecnologie di involucro trasparente innovativo; gli indicatori prestazionali sintetici e i modelli di calcolo semplificati. I temi della ricerca sono stati sviluppati grazie alla partecipazione a progetti di ricerca che hanno permesso di seguire la sperimentazione su diversi casi studio aventi come oggetto esempi significativi di involucri trasparenti.

Nella prima fase della ricerca è stata definita la metodologia per l'acquisizione dei dati in campo e per l'elaborazione dei dati sperimentali. Parallelamente è stata sviluppata l'architettura di un modello di calcolo semplificato per valutare la prestazione energetica di sistemi di facciata trasparenti. La ricerca si conclude con l'analisi dei risultati derivanti dall'applicazione, ai casi studio, della metodologia sviluppata e dalla validazione del modello di calcolo proposto. I principali risultati della ricerca sono descritti in tre parti:

- gli indicatori prestazionali sintetici
- il modello di calcolo MATS
- i casi studio: il progetto e l'applicazione della metodologia per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati sperimentali

Gli indicatori prestazionali sintetici

La ricerca sugli indicatori prestazionali è partita dalla valutazione dei parametri tradizionali (U-value e g-value) determinati con l'elaborazione dei dati sperimentali. I risultati ottenuti, sia per i componenti che per i sistemi di facciata trasparenti, mettono in evidenza una difficoltà dei parametri tradizionali nella descrizione del comportamento delle tecnologie innovative.

I dati sperimentali, raccolti durante diverse campagne di monitoraggio di facciate trasparenti attive, sono stati analizzati con il metodo delle regressioni

lineari e multiple, al fine di verificare se i parametri prestazionali tradizionali potessero caratterizzare il comportamento di queste tecnologie o meno. I risultati delle elaborazioni hanno mostrato che i parametri calcolati non permettono di predire in modo accurato il comportamento fisico tecnico della tecnologia innovativa in analisi. In conclusione non possono considerarsi attendibili i parametri calcolati con le regressioni lineari multiple poiché per più del 50 % del tempo il flusso termico o le energie che attraversano il sistema di facciata attiva sono superiori di più del 20% rispetto ai dati misurati.

I risultati ottenuti da questa attività hanno portato alla definizione di nuovi indicatori prestazionali per valutare la prestazione energetica di facciate trasparenti attive. In questo senso è stato identificato un nuovo indicatore prestazionale per il periodo invernale: il fattore correttivo *btr**, che è stato applicato ad un caso studio di facciata attiva.

Il modello di calcolo MATS e la sua validazione

Il modello di calcolo sviluppato per l'applicazione durante la fase preliminare del progetto, ha presentato dei risultati confrontabili con i dati monitorati. Lo strumento richiede, come dati di input, valori comunemente presenti su schede tecniche e quindi facilmente reperibili, e cosa altrettanto importante in fase di progetto, non richiede tempi di simulazione eccessivamente lunghi. Il modello è stato applicato a due sistemi di facciata trasparente oggetto di studio nel lavoro di tesi ed è possibile affermare che i risultati della validazione forniscono un'indicazione corretta del comportamento della facciata testata. In generale il modello simula correttamente le temperature e i flussi in assenza di radiazione solare, mentre tende a sovrastimare le temperature e i flussi termici in presenza di elevato irraggiamento solare. Il modello semplificato non considera la capacità termica dei nodi della facciata e tende a simulare valori di picco sfasati rispetto ai dati monitorati. Questo elemento mette in evidenza come la capacità termica della facciata giochi, molto probabilmente, un ruolo non trascurabile nell'analisi del comportamento dell'involucro e che quindi gli aspetti capacitivi del sistema non sono semplificabili. In ultima analisi i risultati del modello MATS sono stati confrontati con quelli simulati con un modello di calcolo avanzato, dinamico e capacitivo, sviluppato nel gruppo di ricerca da *F. Zanghirella*. Dal confronto emerge che le temperature calcolate dal modello avanzato mostrano dei risultati migliori rispetto a quelli di MATS, mentre i flussi termici modellati da MATS hanno dei valori più vicini a quelli misurati del modello avanzato. Inoltre il valore di picco calcolato dal modello avanzato e capacitivo coincide con quello misurato. Concludendo il modello MATS può considerarsi validato e può ritenersi adatto a simulazioni in fase preliminare di progetto.

I casi studio: il progetto e l'applicazione della metodologia per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati sperimentali

La metodologia sviluppata nella prima parte del lavoro di tesi è stata applicata ai casi studio per definire le procedure di acquisizione e il metodo di elaborazione dei dati acquisiti.

La partecipazione alla fase progettuale dei componenti di involucro trasparente è stata condotta analizzando diversi materiali innovativi e valutandone i vantaggi in termini architettonici e fisico tecnici. Tra i diversi concept progettuali sviluppati è interessante soffermarsi sulla costruzione dei prototipi di due componenti con carattere innovativo; un vetrocamera con integrazione di materiale

a cambiamento di fase granulare e un triplo vetrocamera con integrazione di materiale a cambiamento di fase e termotropico. I risultati della sperimentazione in campo del primo prototipo sono stati deludenti dal punto di vista fisico tecnico e tecnologico. Infatti la presenza del materiale a cambiamento di fase non portava a dei vantaggi in termini di prestazione energetica e a livello tecnologico i granuli di PCM sono collassati all'interno del vetrocamera, creando delle spaccature. Il secondo prototipo invece ha portato a risultati promettenti per quanto riguarda l'analisi dei dati sperimentali; nel periodo estivo la tecnologia è in grado di ridurre i flussi termici superficiali di 1/3 rispetto alla tecnologia di riferimento. Dal punto di vista della tecnologia, nel momento in cui il materiale a cambiamento di fase non è totalmente liquefatto, ci sono porzioni di PCM solido e altre liquide, che creano situazioni di discontinuità, con dei limiti per l'applicazione architettonica e fisico tecnica.

Due diverse campagne sperimentali su facciate climatiche trasparenti hanno permesso la caratterizzazione dei sistemi analizzati.

I risultati de caso studio sulla facciata climatica Somec (CSb) sono stati confrontati con quelli di una facciata di riferimento e si è misurato che il risparmio energetico per unità di superficie di facciata è di circa il 40% nel periodo invernale e del 48% nel periodo estivo, rispetto alla tecnologia di riferimento. I principali risultati del secondo caso studio, della facciata climatica Coopsette (CSc), derivano dal confronto di due diverse tecnologie di facciata attiva, che sono state caratterizzate tramite l'analisi dei dati sperimentali dal punto di vista termico, luminoso e del comfort termico e acustico.

11.2 Prospettive e sviluppi futuri della ricerca

Partendo dai risultati descritti è possibile individuare le principali prospettive della ricerca, secondo i tre temi principali. Gli sviluppi costituiscono il percorso futuro della ricerca, che ha fondato la sua struttura sulla sperimentazione diretta a livello modellistico e del monitoraggio, e sulla definizione e applicazione di un metodologia.

Gli indicatori prestazionali sintetici

I risultati ottenuti sul tema degli indicatori prestazionali sintetici costituiscono un tassello che contribuisce alla definizione di strumenti per la ricerca su questo tema. La carenza di indicatori prestazionali per caratterizzare tecnologie di involucro trasparente innovativo, infatti è un problema ancora aperto e la necessità di definire indicatori adatti ad essere utilizzati dal progettista, costituisce ancora un tema di ricerca con ampie prospettive di sviluppo. In particolare dall'esperienza dei casi studio emerge che ogni tecnologia con un comportamento dinamico e innovativo dovrebbe essere caratterizzata con un proprio parametro distinto.

Il modello di calcolo MATS

La validazione del modello può essere condotta su altri casi studio in modo da verificare i risultati al variare della tecnologia di facciata. Una volta che il modello sarà validato su diverse tipologie di sistemi di facciata attiva, per diverse stagioni e configurazioni di funzionamento, attraverso un'analisi di sensibilità si

potrà calibrare il modello al fine di ottenere valori di flusso termico più vicini ai dati misurati. Si potrebbero inoltre definire dei coefficienti correttivi al fine di ridurre lo sfasamento dei flussi termici, in funzione delle proprietà geometriche dei materiali della facciata.

I casi studio: il progetto e l'applicazione della metodologia per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati sperimentali

L'esperienza sui casi studio affrontati nel lavoro di tesi dovrebbe essere ampliata e approfondita con ulteriori analisi sperimentali; in particolare per quel che riguarda il caso studio 2 (CS2) e, nello specifico, in riferimento sia all'analisi sul materiale a cambiamento di fase che a quella sul termotropico.

Relativamente all'esperienza sviluppata sui casi studio dei componenti e dei sistemi di involucro trasparente, si evidenzia come le proprietà delle tecnologie innovative, con un comportamento attivo e dinamico, costituiscano degli elementi complessi dell'edificio. La loro progettazione deve contemplare contemporaneamente diversi aspetti; da quelli architettonici a quelli fisico tecnici. Questo porta alla definizione di tecnologie che devono essere studiate e disegnate al fine ottimizzare la prestazione energetica, il comfort; termico, acustico e luminoso. Per lo sviluppo futuro dell'involucro edilizio innovativo è dunque necessaria una progettazione integrata, tra l'architettura, l'impianto e la tecnologia. La penetrazione sul mercato di queste tipologie di componenti e sistemi sarà facilitata dal raggiungimento di ulteriori obiettivi nelle prime due linee di ricerca sviluppate nel lavoro di tesi.

Appendici

Parametri statistici per la valutazione delle simulazioni

Sono riportati gli indici statistici utilizzati per valutare le regressioni lineari semplici e multiple; per confrontare i risultati ottenuti con due diversi modelli di simulazione e per confrontare i dati sperimentali con quelli simulati.

La **varianza** è uno tra gli indici più importanti per definire il grado di variabilità o dispersione di due serie di dati con un numero di letture n [70]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

L'indice è definito tramite il confronto tra ogni dato x_i con la media \bar{x} e sommando i quadrati delle differenze così ottenute. Maggiore sarà la varianza più i dati si discostano dalla media, ovvero tanto più sono eterogenei.

L'**indice di variabilità** o **deviazione standard**, definito come la radice quadrata della varianza:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Con l'indice σ la variabilità dei dati non è definita con il quadrato dei dati, ma con l'unità di misura dei dati confrontati.

La **covarianza** definisce la relazione tra le coppie di date di due serie. In particolare si confronta la variazione tra le coppie di dati rispetto ai corrispondenti valori medi. Si definisce come :

$$c_{xy} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}_i) \quad (3)$$

La covarianza assume un valore positivo o negativo che diventa elevato quando le due serie di dati sono fortemente correlate. Viceversa se le due serie non sono correlate la covarianza assume valori prossimi allo zero.

Nelle regressioni lineari semplici per definire il grado di approssimazione della retta che descrive la relazione tra le due variabili si è introdotto il **coefficiente di correlazione lineare** definito come:

$$r_{xy} = \frac{c_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

Dove:

c_{xy} è la covarianza tra x_i e y_i

σ_x e σ_y sono le deviazioni standard della serie di dati x e y

Il coefficiente r_{xy} è un valore appartenente all'intervallo $[-1,1]$, è nullo quando le due serie di dati sono incorrelate statisticamente, ed è uguale ad 1, in valore assoluto quando le coppie di dati si trovano esattamente allineate sulla retta $y=mx+q$ [70]. Il segno negativo o positivo del coefficiente indica che la retta di regressione è, rispettivamente discendente o ascendente.

Il quadrato del coefficiente di correlazione r_{xy} è R^2 :

$$\sqrt{R^2} = |r_{xy}| \quad (5)$$

Il coefficiente R^2 può essere utilizzato anche per regressioni lineari multiple (a differenza di r_{xy}) è dunque definito come:

$$R^2 = 1 - \frac{D_{RES}}{D_{TOT}} \quad (6)$$

Dove:

D_{RES} devianza dei residui, è definita come la differenza al quadrato tra le osservazioni Y_i e la loro stima \hat{Y}_i .

D_{TOT} devianza totale, è definita come la differenza al quadrato tra le osservazioni Y_i e il loro valore medio \bar{Y} .

Con il termine *residui* si intende il termine E_i nell'equazione di regressione:

$$Y_i = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_1 + \alpha_2 \cdot X_2 + \dots + \alpha_n \cdot X_n + E_i \quad (7)$$

Il termine residuo descrive lo scostamento dal valore atteso per cause aleatorie ed assume un valore diverso per ogni elemento della correlazione, si definisce come:

$$E_i = \hat{Y}_i - Y_i \quad (8)$$

E_i è dunque la differenza per ogni elemento della regressione tra i valori assunti dal carattere Y_i e le sue stime secondo la regressione \hat{Y}_i .

Statisticamente viene definito valido un modello di regressione lineare se verifica diverse ipotesi relative ai residui:

- che abbiano media nulla
- identica varianza σ^2
- che siano incorrelati
- che siano normalmente distribuiti

Per effettuare il confronto tra diversi modelli di calcolo o tra i risultati delle simulazioni e i valori monitorati si sono utilizzati l'indice EQM e EQMP, rispettivamente errore quadratico medio e errore quadratico medio percentuale.

$$EQM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (s_i - e_i)^2 \quad (9)$$

$$EQMP = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_i - e_i}{e_i} \right)^2 \quad (10)$$

dove con s si indicano i dati provenienti dalle simulazioni e con e i dati sperimentali. Si è anche calcolata la radice dell'errore quadratico medio REQM e la radice quadrata dell'errore quadratico medio percentuale REQMP definiti come:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (s_i - e_i)^2} \quad (11)$$

$$REQMP = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_i - e_i}{e_i} \right)^2} \quad (12)$$

Si è inoltre calcolato il valore medio della differenza assoluta media tra i dati misurati e modellati $|\Delta|_m$ e la deviazione standard come:

$$|\Delta_i| = |s_i - e_i| \quad (13)$$

$$|\Delta|_m = \frac{|\Delta_i|}{n} \quad (14)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (|\Delta_i| - |\Delta_m|)^2} \quad (15)$$

La radiazione solare

Per determinare l'angolo di incidenza della radiazione solare per l'esposizione della FTA alle diverse ore di simulazione si sono utilizzate le equazioni sviluppate nel lavoro sulla radiazione solare di *Y. Cascone et al* [30], [31]. La posizione del sole è definita da:

- β altezza solare,
- Ψ azimut solare,
- φ latitudine della località,
- δ declinazione solare,
- ω angolo orario per definire, l'ora solare apparente

La **declinazione**, assunta positiva verso nord, può essere ricavata mediante l'equazione di Cooper (1969) [30]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284 + g}{365} \right) \quad (16)$$

dove g è il giorno dell'anno.

L'**angolo orario** ω è l'angolo formato dal piano meridiano passante per l'osservatore con il piano meridiano passante per il sole [30]:

$$\omega = (12 - h_s) \cdot 15 \quad (17)$$

dove h_s è l'ora solare.

Si è considerato l'angolo orario positivo in senso antiorario, per cui da sud sarà positivo verso est e negativo verso ovest.

L'**ora solare** h_s può essere calcolata attraverso l'ora convenzionale e la longitudine della località, secondo la relazione:

$$h_s = h_c - h_i + \frac{ET}{60} + \frac{\lambda_L - \lambda_{mr}}{15} \quad (18)$$

dove:

h_c è l'ora convenzionale dell'orologio;

h_i è pari a 1 se è in vigore l'ora legale, altrimenti è pari a 0

λ_{mr} è la longitudine del meridiano di riferimento (15° ogni ora di differenza

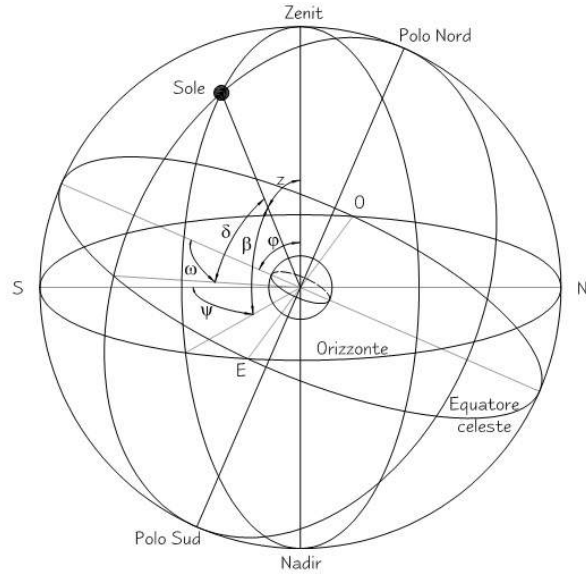


Figura 1: Posizione del sole, dalla figura 1.1 di [30].

rispetto a GMT);

ET è l'equazione del tempo, in minuti.

L'**equazione del tempo** è un fattore correttivo che permette di considerare che la velocità di rivoluzione della terra non è costante durante tutto l'anno [30], [19]:

$$ET = 2,2918 \cdot (0,0075 + 0,1868 \cdot \cos \beta - 3,2077 \cdot \sin \beta - 1,4625 \cdot \cos 2\beta - 4,089 \cdot \sin 2\beta) \quad (19)$$

Dove β è il coefficiente di torbidezza di Ångström, per la stima degli effetti dello scattering dovuto alle polveri e all'acqua nell'atmosfera in funzione della lunghezza d'onda, che si determina a partire dall'equazione del fattore di torbidezza [30]:

$$\tau_{a,\lambda} = e^{(-\beta_A \lambda^{-\alpha_m})} \quad (20)$$

L'**angolo di altezza solare** è l'angolo formato dalla retta sole-terra con il piano dell'orizzonte:

$$\beta = \arcsin(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad (21)$$

L'**angolo di azimut solare** è formato dalla proiezione della retta sole-terra sul piano dell'orizzonte con la direzione sud (positivo verso est):

$$\Psi = \arccos \left(\frac{\sin \beta \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \right) \cdot \sin \omega \quad (22)$$

Bibliografia

- [1] Fraunhofer ibp, test facility, determination of the solar heat gain coefficient (SHGC) of building components.
- [2] Glassway – le verre de l'antiquité au contemporain.
- [3] Solarleaf – bioreactor façade.
- [4] ISO 10077-2:2012. Thermal performance of windows, doors and shutters - calculation of thermal transmittance - part 2: Numerical method for frames.
- [5] ISO 10292:1994. Glass in building - calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing.
- [6] UNI 10840:2007. Luce e illuminazione - locali scolastici - Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale.
- [7] UNI EN 12464-1:2004. Luce e illuminazione - illuminazione dei posti di lavoro - parte 1: Posti di lavoro in interni.
- [8] UNI EN ISO 13786:2008. Prestazione termica dei componenti per edilizia - caratteristiche termiche dinamiche - metodi di calcolo.
- [9] UNI EN ISO 13790:2008. Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.
- [10] UNI EN ISO 140-5:2000. Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate.
- [11] ISO 15099:2003. Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations.
- [12] UNI EN 410:2011. Vetro per edilizia - determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate.
- [13] UNI EN ISO 7730:2006. Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.
- [14] ISO 9050:2003. Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.

- [15] a cura di Spagnolo R. *Manuale di acustica applicata*. Città studi edizioni, 2014.
- [16] S. Altomonte. *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per una architettura sostenibile*. Alinea Editrice, 2004.
- [17] E. Arens, R. Gonzales, and L. Berglund. Thermal comfort under an extended range of environmental conditions. *ASHRAE transaction*, page 92, 1986.
- [18] F. Asdrubali, G. Baldinelli, and S. Schiavoni. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Proceedings of Building Simulation 2011*, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November, 2011.
- [19] ASHRAE. *2009 ASHRAE handbook: fundamentals*.
- [20] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94:87–105, 2010.
- [21] G. Baldinelli. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment*, 44:1107–1118, 2009.
- [22] R. Banham. *The Architecture of the Well-tempered Environment*. The University of Chicago Press, Second edition, 1984.
- [23] L. Bianco, Y. Cascone, A. Gorrino, V. Corrado, and V. Serra. A simplified hourly model for energy characterisation of transparent active façades. a comparison between simulation results and monitored data. volume 3-4 October, pages 397–405, 2013.
- [24] L. Bianco, F. Goia, and V. Serra. Energy performance assessment of advanced glazed façades in office buildings. In *CLIMA 2013 11th REHVA World Congress and 8th International Conference on IAQVEC, Energy Efficient, Smart and Healthy Buildings, Society of Environmental Engineering (STP)*, Prague, Czech Republic 16/06-19/06/2013, 2013.
- [25] L. Bianco and M. Perino. Il ruolo dell'involucro edilizio nell'edificio a basso consumo energetico - the role of energy-efficient building envelope. *Atti e Rassegna Tecnica - Società degli ingegneri e architetti in Torino, vol. LXVI - N. 1 - 2- 3 n. 145*, pages 53–60, 2012.
- [26] L. Bianco, V. Serra, F. Larcher, and M. Perino. Experimental assessment of a green wall modular system: effects on heat transfer and internal surface temperature control. In: *5th International Building Physics Conference (IBPC 2012), Kyoto (Giappone), May 28-31*, pages 417–423, 2012.
- [27] P. Blanus, W.P. Goss, H. Roth, P. Weitzmann, C. F. Jensen, S. Svendsen, and H. Elmahdy. Comparison between ASHRAE and ISO thermal transmittance calculation methods. *Energy and Buildings*, 39:374–384, 2007.

- [28] C. Buratti and E. Moretti. Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems. *Applied Energy*, 97:430–437, 2012.
- [29] E. Candelari, P. Tarizzo, V. Serra, A. Schiavi, and F. Russo. Acoustic performance of a green modular system. *International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013, Merano 18-21 March 2013*, pages 746–749, 2013.
- [30] Y. Cascone, V. Corrado, and C. Serra, V. and Toma. *Calcolo dell’ombreggiamento sull’involucro dell’edificio*. Report RSE/2010, ENEA, 2010.
- [31] Y. Cascone, V. Corrado, and V. Serra. Calculation procedure of the shading factor under complex boundary conditions. *Solar Energy*, 85:2524–2539, 2011.
- [32] LBNL University of California Berkley CBE Center for the Built Environment. Window performance for human thermal comfort. *Final report to the National Fenestration Rating Council*, pages 1–76, 2006.
- [33] P. Cheol-Soo, A. Godfried, M. Tahar, T. Mate, and S. Nader. Calibration of a lumped simulation model for double-skin façade systems. *Energy and Buildings*, 36:1117–1130, 2004.
- [34] A. Compagno. *Intelligent glass façades*. Birkhäuser Publishers, 2002.
- [35] S. P. Corgnati, M. Perino, and V. Serra. Experimental assessment of the performance of an active transparent facade during actual operating conditions. *Solar Energy*, 81:993–1013, 2007.
- [36] V. Corrado and V. Serra. La valutazione dell’ombreggiamento per il calcolo del guadagno solare. *Congresso nazionale ATI 55*, 15-20 settembre 2000.
- [37] V. Corrado and V. Serra. *Modello di calcolo per l’analisi energetica di sistemi di facciata complessi*. Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, PT DE 508/FT, 1999.
- [38] A. M. Coutts, E. Daly, J. Beringer, and N. J. Tapper. Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*, 70:266–276, 2013.
- [39] A. De Gracia, A. Castell, L. Navarro, E. Orò, and L. F. Cabeza. Numerical modelling of ventilated facades: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22:539–549, 2013.
- [40] A di Bella. *Manuale d’ausilio alla progettazione termotecnica. La qualità degli ambienti interni. Il benessere acustico*. Aicarr, 2004.
- [41] Environmental Energy Technologies Division. *Therm 6.3/Window 6.3 NFRC Simulation Manual*. 2013.
- [42] J. A. Duffie and W. A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2006.
- [43] R.A Furler. Angular dependence of optical properties for homogeneous glasses. *ASHRAE Transactions*, 97(2), 1991.

- [44] F. Goia, L. Bianco, Y. Cascone, M. Perino, and V. Serra. Experimental analysis of an advanced dynamic glazing prototype integrating PCM and thermotropic layers. *Energy Procedia*, 48C:1272–1281, 2014.
- [45] F. Goia, L. Bianco, M. Perino, and V. Serra. Energy performance assessment of an advanced integrated façade through experimental data analysis. *Energy Procedia*, 48C:1262–1271, 2014.
- [46] F. Goia, L. Bianco, V. Serra, and M. Perino. Energy performance assessment of advanced integrated façades by means of synthetic metrics. In *ISHVAC 2013: Future of HVAC, Xi'an, China, 19 - 21 October 2013*, Lecture notes in electrical engineering, 2013.
- [47] F. Goia, M. Perino, and M. Haase. A numerical model to evaluate the thermal behaviour of pcm glazing system configurations. *Energy and Buildings*, 54, 2012.
- [48] F. Goia, M. Perino, and V. Serra. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. *Solar Energy Solar Energy*, 100:217–233, 2014.
- [49] F. Goia, M. Perino, V. Serra, and F. Zanghirella. Experimental assessment of the thermal behaviour of a PCM glazing. In editor, editor, *IAQVEC 2010, Syracuse, New York, USA*, 2010.
- [50] F. Goia, M. Zinzi, E. Carnielo, and V. Serra. Characterization of the optical properties of a pcm glazing system. *Energy Procedia*, 30, 2012.
- [51] B.L. Gowreesunkera, S.B. Stankovicb, S.A Tassoua, and P.A. Kyriacoub. Experimental and numerical investigations of the optical and thermal aspects of a PCM-glazed unit. *Energy and Buildings*, 61, 2013.
- [52] F. Gugliermetti, F. Bisegna, and L. Monti. *Linee guida per l'utilizzazione della luce naturale*. ENEA, 2010.
- [53] K. Halskow and T. Ebsen. A framework for designing complex media façades. *Design Studies*, 43:663–679, 2013.
- [54] J. Hensen, M. Bartak, and F. Drkal. Modeling and simulation of a double-skin façade system. *Applied Thermal Engineering*, 108:1251–1259, 2002.
- [55] K. A.R. Ismail, C.T. Salinas, and J.R. Henriquez. Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows. *Energy and Buildings*, 40:710–719, 2008.
- [56] B. P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey, and R. Hart. Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96:1–28, 2012.
- [57] J. T. Kim and M. S. Todorovic. Tuning control of buildings glazing's transmittance dependence on the solar radiation wavelength to optimize daylighting and building's energy efficiency. *Energy and Buildings*, 63:108–118, 2013.

- [58] F. Kuznik, T. Catalina, L. Gauzere, M. Woloszyn, and J.J. Roux. Numerical modelling of combined heat transfers in a double skin façade full-scale laboratory experiment validation. *Applied Thermal Engineering*, 31:3043–3054, 2011.
- [59] Dip. di Energetica Laboratorio di taratura, Politecnico di Torino. *Taratura di indicatori in linea con TRP/TC, termoresistori per confronto con TRP di seconda linea*. 2004.
- [60] P. Lyons, D. Arasteh, and C. Huizenga. Window performance for human thermal comfort. *Proceeding of ASHRAE Winter Meeting, Dallas, TX, February 5-9, 2000*, page 92, 2000.
- [61] H. Manz. Total solar energy transmittance of glass double façades with free convection. *Energy and Building*, pages 127–136, 2004.
- [62] H. Manz, P.W. Eglolf, P. Suter, and A. Goetzberger. Tim-pcm external wall system for solar space heating and daylighting. *Solar Energy*, 61, 1997.
- [63] H. Manz and T. Frank. Thermal simulation of buildings with double-skin façades. *Energy and Buildings*, 37:1114–1121, 2005.
- [64] M.E. McEvoy, R.G. Southall, and P.H. Baker. Test cell evaluation of supply air windows to characterise their optimum performance and its verification by the use of modelling techniques. *Energy and Buildings*, 35:1009–1020, 2003.
- [65] JCGM member organizations. *JCGM 200:2012, International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) third edition, 2008 version with minor corrections*. 2012.
- [66] C. Micono. Facciate attive trasparenti : analisi prestazionale attraverso misure in test cells, 2006.
- [67] A. Nabil and J. Mardaljevic. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*, 37:41–59, 2005.
- [68] A. Nabil and J. Mardaljevic. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38:905–913, 2006.
- [69] I. Paoletti. *Costruire le forme complesse: nnovazione, industrializzazione e trasferimento per l’involucro architettonico*. Alinea Editrice, 2007.
- [70] F. Pellerey. *Elementi di statistica per le applicazioni*. Celid, 1998.
- [71] M. Perino. *IEA-Annex 44 - State of the art review. Responsive Buildings elements*,. Øyvind Aschehoug: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway, Marco Perino, Politecnico di Torino, Dipartimento di Energia (Torino), 2010.
- [72] M. Perino, V. Serra, F. Zanghirella, and M. Filippi. Efficienza energetica di facciate trasparenti attive: valutazioni attraverso misure in laboratorio. *Atti di convegno*, 61° Congresso Nazionale ATI – Perugia 12-15 Settembre:161–166, 2006.

- [73] H. Poirazis. *Double Skin Façades for Office Buildings*. Division of Energy and Building Design Department of Construction and Architecture Lund Institute of Technology, 2004.
- [74] G. Quesada, D. Rousse, Y. Dutil, M. Badache, and S. Hallé. A comprehensive review of solar façade. transparent and translucent solar façade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, page 2643–2651, 2012.
- [75] P.P.L. Regtien, F. Van der Heijden, M.J. Korsten, and W. Olthius. *Measurement Science for Engineers*. Butterworth Heinemann, 2004.
- [76] C. F. Reinhart. Daylight availability and manual lighting control in office buildings - simulation studies and analysis of measurements, ottobre 2001.
- [77] C.F. Reinhart and O. Walkenhorst. Validation of dynamic radiance-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33:683–697, 2001.
- [78] K. Roth, T. Lawrence, and J. Brodrick. Double-skin façades. *ASHRAE Journal*, pages 70–73, 2007.
- [79] H. H. Saber. Investigation of thermal performance of reflective insulations for different applications. *Building and Environment*, 52:32–44, 2012.
- [80] S. B. Sadineni, S. Madala, and R. F. Boehm. Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:3617–3631, 2011.
- [81] D. Saelens. Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades, settembre 2002.
- [82] D. Saelens, S. Roels, and H. Hens. The inlet temperature as a boundary condition for multiple-skin façade modelling. *Energy and Building*, 36:825–835, 2004.
- [83] P. Scheerbart. *Architettura di vetro*. Adelphi, 1982.
- [84] V. Serra and L. Bianco. Involucro opachi e trasparenti di ultima generazione: prestazioni energetiche e soluzioni tecniche - next generation building envelope components: energy performance and technical solution. *Atti e Rassegna Tecnica - Società degli ingegneri e architetti in Torino, vol. LXVI - N. 1 - 2- 3 n. 145*, pages 61–68, 2012.
- [85] M.A. Shameria, M.A. Alghoulb, O. K. Elayebb, M. Fauzi, M.S. Zaina, M. Alrubaiha, Halizawati Amirb, and K. Sopianb. Daylighting characteristics of existing double-skin façade office buildings. *Energy and Buildings*, 59:279–286, 2013.
- [86] M.A. Shameria, M.A. Alghoulb, K. Sopianb, M. Fauzi, M. Zaina, and Omkalthum Elayebb. Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:1468–1475, 2011.

- [87] H. Taehoon, K. Jimin, L. Juyoung, K. Choongwan, and S. P. Hyo. Best faÇade best practice for double skin façades, wp 1 report “state of the art”. *Wolfgang Streicher, Institut of Thermal Engeneering, Graz University of Technology*, pages 1–151, 2005.
- [88] H. Taehoon, K. Jimin, L. Juyoung, K. Choongwan, and S. P. Hyo. Assessment of seasonal energy efficiency strategies of a double skin façade in a monsoon climate region. *Energies*, vol. 6, pages 4352–4376, 2013.
- [89] D. Urban, P. Zat’ko, and T. Dhlý. Comparison measuring methods of sound insulation of double transparent façade. nbs bratislava. *Advanced Materials Research*, 855:241–244, 2014.
- [90] A. Weber and K. Resch. Thermotropic glazings for overheating protection. *Energy Procedia*, pages 471–477, 2012.
- [91] H. Weinläder, A. Beck, and J. Fricke. Pcm-facade-panel for daylighting and room heating. *Solar Energy*, 78:177–186, 2005.
- [92] J. Wienold and J. Christoffersen. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of ccd cameras. *Energy and Buildings*, 38:743–757, 2006.
- [93] M. Wigginton and J. Harris. *Intelligent skins*. Architectural Press, 2002.
- [94] Rogers Z. Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool: development report and case studies. *Boulder, Colorado, USA: Architectural Energy Corporation*, 2006.
- [95] F. Zanghirella. Le prestazioni energetiche delle facciate trasparenti attive: metodi di analisi sperimentale e modellazione numerica, luglio 2008.
- [96] F. Zanghirella, M. Perino, and V. Serra. A numerical model to evaluate the thermal behaviour of active transparent façades. *Energy and Buildings*, 43:1123–1138, 2011.
- [97] R. Zecchin and A. Fornasiero. *Manuale d’ausilio alla progettazione termotecnica. La qualità degli ambienti interni. Il benessere visivo*. Aicarr, 2004.
- [98] M. Zinzi. *Caratterizzazione e valutazione di materiali trasparenti innovativi e sistemi schermanti*. Report RSE/2009/9, ENEA, 2009.

Elenco delle figure

1	Schema sinottico del lavoro di tesi.	4
2.1	L'evoluzione dell'involucro edilizio da [84]	10
2.2	Posizionamento di areogel granulare nell'intercapedine di un vetrocamera.	12
2.3	Cella di prova GReens Environment park.	14
2.4	L'involucro edilizio responsivo	19
2.5	La classificazione delle facciate	20
2.6	Principio di funzionamento delle FTA.	22
4.1	Esempio di dati di input per vetro termocromico, software WINDOW.	41
4.2	Esempio di output vetro termotropico software WINDOW, parametri dinamici in funzione della temperatura del vetro.	41
4.3	Interfaccia ParaSol	42
4.4	Schermata di COMFEN	42
4.5	Facciata attiva, giornata estiva soleggiata. Confronto tra le temperature superficiali orarie simulate con WIS e misurate. A sinistra temperature superficiali esterne a destra temperature superficiali interne.	45
4.6	Facciata attiva, giornata invernale soleggiata. Confronto tra le temperature superficiali orarie simulate con WIS e misurate. A sinistra temperature superficiali esterne a destra temperature superficiali interne.	46
4.7	Facciata attiva, giornata invernale soleggiata. Confronto tra le energie totali simulate e misurate a sinistra. Confronto tra le energie simulate con valore di g a incidenza normale e variabile in funzione dell'angolo di incidenza del sole.	46
4.8	Facciata attiva, giornata invernale soleggiata. Energie simulate con WIS e misurate	47
4.9	Schema dell'equivalente termico di una configurazione di FTA da fig. 3.2 tesi di dottorato <i>F. Zanghirella</i> [95] a sinistra. Discretizzazione e schema di calcolo dello scambio termico per conduzione tra i layers del vetro da fig. 6 [96].	49
4.10	Schema degli scambi termici in ogni zona del sistema di facciata da fig. 2 in [96].	49
4.11	Validazione del modello con dati sperimentali, configurazione con schermatura a rullo. Temperatura della schermatura a sinistra, andamento dei flussi termici a destra da fig. 10 e 13 in [96].	50

5.1	Termocoppia a sinistra giunto freddo (per la connessione all'acquisitore) a destra giunto caldo.	54
5.2	Curva di taratura di una termocoppia.	59
5.3	Curva di taratura di 36 termocoppie.	60
5.4	Correlazione tra i valori di temperatura misurati dalle termocoppie (asse delle y) e quelli della termoresistenza di precisione (asse delle x) per i tre diversi set point.	61
5.5	Piastra calda con anello di guardia.	61
5.6	Verifica dei solarimetri.	62
5.7	Schermatura di termocoppie.	63
5.8	Test cell sulla copertura del dip. Energia del Politecnico di Torino. Schermatura dei sensori di temperatura e flusso termico con nastro alluminato. Il materiale a cambiamento di fase dietro al termoflussimetro non si è sciolto a causa della schermatura con nastro alluminato.	64
5.9	Test cell sulla copertura del dip. Energia del Politecnico di Torino. Schermatura dei sensori di temperatura e flusso termico con nastro alluminato.	65
5.10	Misura con sonda intensimetrica.	66
5.11	Schema delle scansioni da effettuare con la sonda intensimetrica sulla parete da testare.	67
5.12	Luxmetro portatile a sinistra e luxmetro per misure in continuo.	69
5.13	Misure con video luminanzometro. <i>Omissis</i>	70
5.14	Misure di portata d'aria nell'intercapedine di una FTA con gas traccianti ad emissioni costanti. <i>Omissis</i>	70
6.1	Schema della posizione dei sensori di misura, solarimetri esterno verticale e orizzontale, interno e termoflussimetro.	72
6.2	Esempio di regressione lineare per la determinazione del valore di trasmittanza termica.	74
6.3	Esempio di andamento del coefficiente di trasmissione solare.	75
6.4	Esempio di andamento di trasmissione luminosa di tre diverse tecnologie vetrate a confronto.	83
6.5	Esempio di modello tridimensionale di una cella di prova simulata con HyperComfort.	84
6.6	Esempio di mappa di valori di PMV in un ambiente testato con HyperComfort.	85
6.7	Esempio di mappe di luminanza. <i>Omissis</i>	85
7.1	Schema di INPUT e OUTPUT del modello di calcolo.	90
7.2	Schema di equivalente elettrico di una FTA, a destra i layers della FTA.	91
7.3	Comportamento del componente trasparente alla radiazione solare diretta a sinistra e diffusa a destra.	93
7.4	Angolo di incidenza, riflessione e trasmissione all'interfaccia di due mezzi con indice di rifrazione n_1 e n_2 da figura 1 di [43].	94
7.5	Bilancio short-wave sul nodo.	96
7.6	Matrice per determinare i coefficienti di trasmissione e riflessione dei diversi nodi secondo l'equazione 7.9.	98
7.7	Scambio termico convettivo in intercapedine sigillata.	100

7.8	Scambio termico convettivo in intercapedine ventilata	102
7.9	Bilancio sul nodo	104
7.10	Matrice di equazioni implementate per la risoluzione delle equazioni dei nodi. Per t si veda equazione 7.71.	106
8.1	I Casi Studio.	107
8.2	TWINS, cella A e B, in mezzo GReens cella di prova.	109
8.3	Studio dei concept dei componenti trasparenti.	110
8.4	Assemblaggio del prototipo vetrocamera con PCM granulare CS1, presso l'azienda MBT.	112
8.5	Il componente CS1 montato sulla test cell. A sinistra e sopra a destra subito dopo il montaggio, sotto dopo qualche mese.	113
8.6	Schema dei sensori CS1.	114
8.7	Schema dei sensori CS2.	115
8.8	Componenti dinamici e tecnologie di riferimento.	116
8.9	Schema dei sensori CSa da [95].	120
8.10	La facciata attiva Avant Grip a sinistra, la facciata passiva a destra.	121
8.11	Schema dei sensori della facciata Somec, CSb.	124
9.1	Condizioni al contorno, flussi termici superficiale che attraversano il componente trasparente DGU+PCM e il riferimento DGU.	128
9.2	Flussi termici totali ed energie totali che attraversano il componente trasparente DGU+PCM e il riferimento DGU.	129
9.3	Giornata in analisi, condizioni al contorno, flussi termici superficiale che attraversano il componente trasparente DGU+PCM e il riferimento DGU.	129
9.4	Giornata in analisi, flussi termici totali ed energie totali che attraversano il componente trasparente DGU+PCM e il riferimento DGU.	129
9.5	Andamento del coefficiente di trasmissione luminosa, giornata con cielo coperto (8/11/2013).	131
9.6	Andamento del coefficiente di trasmissione luminosa, giornata con cielo sereno (11/11/2013).	131
9.7	Confronto tra giornata a cielo coperto e a cielo sereno. Immagini all'esterno e all'interno della cella di prova dalle ore 09:00 alle 12:00.	133
9.8	Confronto tra giornata a cielo coperto e a cielo sereno. Immagini all'esterno e all'interno della cella di prova dalle ore 13:00 alle 16:00.	134
9.9	Coefficiente di trasmissione solare cielo sereno.	135
9.10	Coefficiente di trasmissione solare cielo coperto.	135
9.11	Regressione lineare per verificare la correlazione tra la temperatura superficiale e il coefficiente di trasmissione solare del vetro TGU-TT.	136
9.12	Regressione lineare per calcolare la conduttanza termica dei tre componenti trasparenti.	137
9.13	Flussi termici superficiali che attraversano la configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU.	139
9.14	Flussi termici totali che attraversano la configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU.	139

9.15	Radiazione solare trasmessa attraverso la configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU.	139
9.16	Energia giornaliera attraverso la configurazione $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU.	140
9.17	Flussi termici superficiali $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU e TGU-TT.	142
9.18	Flussi termici totali $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU e TGU-TT.	142
9.19	Energia giornaliera totale $TGU - TT + PCM(in)$ a sinistra e $TGU - TT + PCM(out)$ a confronto con il componente di riferimento TGU e TGU-TT.	142
9.20	Trasmittanza termica equivalente a sinistra CSb, a destra R-CSb, estate 2010.	147
9.21	Trasmittanza termica equivalente a sinistra CSb, a destra R-CSb, inverno 2010-11.	147
9.22	Trasmittanza termica equivalente a sinistra CSb, a destra R-CSb, primavera 2011.	147
9.23	Trasmittanza termica equivalente a sinistra CSb, a destra R-CSb, estate 2011.	147
9.24	Fattore solare equivalente per l'estate 2010 sopra, estate 2011 sotto.	149
9.25	Flussi termici totali, giornata estiva, CSb e R-CSb con tenda esterna.	150
9.26	Flussi termici totali, giornata estiva, CSb e R-CSb.	151
9.27	Flussi termici superficiali, giornata invernale nuvolosa, CSb e R-CSb.	151
9.28	Le energie normalizzate attraverso le due tecnologie di facciata, periodo invernale, estivo e primaverile.	152
9.29	Tecnologia di riferimento. Correlazione lineare per determinare il valore di U^* a sinistra. Correlazione lineare per determinare il valore di g^* per le diverse stagioni a destra.	154
9.30	Facciata climatica CSb. Correlazione lineare per determinare il valore di U^* a sinistra. Correlazione lineare per determinare il valore di g^* per le diverse stagioni a destra.	155
9.31	Tecnologia di riferimento. Confronto tra i flussi termici a sinistra, e le energie a destra. Valori calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL messi a confronto con i valori monitorati.	155
9.32	Facciata climatica CSb. Confronto tra i flussi termici a sinistra, e le energie a destra. Valori calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL messi a confronto con i valori monitorati.	156
9.33	Validazione dei risultati con il primo modello RLM. Confronto tra i flussi termici totali a sinistra e le energie a destra, calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL e i valori monitorati ($\beta_0 \neq 0$).	159

9.34	Validazione dei risultati con il secondo modello RLM. Confronto tra i flussi termici totali a sinistra e le energie a destra, calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL e i valori monitorati ($\beta_0 \neq 0$).	160
9.35	Validazione dei risultati con il terzo modello RLM. Confronto tra i flussi termici totali a sinistra e le energie a destra, calcolati con i parametri prestazionali determinati con il metodo delle RL e i valori monitorati	161
9.36	Energie e analisi PMV calcolato a 75 cm dalle facciate CSb, piano terra e primo e R-CSb, screen OFF (26/09/11).	163
9.37	Energie e analisi PMV calcolato a 75 cm dalle facciate CSb, piano terra e primo e R-CSb, screen ON, (30/06/11).	165
10.1	Condizioni al contorno delle due giornate utilizzate per la validazione, CSa.	171
10.2	Coefficiente di trasmissione solare τ_s , confronto tra dati misurati e modellati, CSa.	172
10.3	Temperatura superficiale interna t_4 , dati misurati e simulati, CSa.	173
10.4	Temperatura superficiale esterna t_1 , dati misurati e simulati, CSa.	174
10.5	Temperatura della schermatura t_3 , dati misurati e simulati, CSa.	174
10.6	Temperatura dell'aria in intercapedine $tgap3$ (lato interno), dati misurati e simulati, CSa.	175
10.7	Flussi termici superficiali, dati misurati e simulati, CSa.	175
10.8	Temperatura superficiale esterna, t_1 , dati misurati e simulati, CSa. Con $sim1$ =risultati MATS, con $sim2$ =risultati F.Z.	179
10.9	Temperatura superficiale interna, t_4 , dati misurati e simulati, CSa. Con $sim1$ =risultati MATS, con $sim2$ =risultati F.Z.	180
10.10	Temperatura superficiale schermo, t_3 , dati misurati e simulati, CSa. Con $sim1$ =risultati MATS, con $sim2$ =risultati F.Z.	180
10.11	Flussi termici superficiali, dati misurati e simulati, CSa. Con $sim1$ =risultati MATS, con $sim2$ =risultati F.Z.	181
1	Posizione del sole, dalla figura 1.1 di [30].	194

Elenco delle tabelle

6.1	Parametri di ingresso assunti secondo indicazioni della norma UNI EN ISO 7730/2006.	84
7.1	Parametri di input del modello. (* per angolo di incidenza normale al layer)	89
7.2	Parametri di output del modello.	90
8.1	I Casi Studio (CS) di componenti e sistemi di facciata analizzati, luogo di raccolta dei dati sperimentale e tipologia di analisi dei dati. EDS=Elaborazione Dati Sperimentali, CVM=Calibrazione e Validazione del modello di simulazione semplificato sviluppato.	108
8.2	Proprietà del vetro termotropico, <i>off</i> e <i>on</i> , sotto e sopra la temperatura di attivazione del polimero (da scheda tecnica per lastra 2x1 mm vetro chiaro con polimero $\sim 1,7$ mm).	117
8.3	Calendario delle misure CS2.	117
8.4	Descrizione dei prototipi.	118
8.5	Stratigrafia del sistema di facciata attiva e passiva simulate.	122
9.1	Coefficienti di trasmissione luminosa (τ_l) cielo coperto.	132
9.2	Condizioni al contorno per il periodo estivo.	138
9.3	Condizioni al contorno per il periodo invernale.	141
9.4	Coefficienti di trasmissione luminosa CSb [-].	145
9.5	Coefficienti di trasmissione solare CSb.	146
9.6	I valori dei coefficienti β calcolati con l'equazione dei flussi termici totali (RLM1).	157
9.7	I valori dei coefficienti β_{24} calcolati con l'equazione delle energie totali giornaliere (RLM1).	158
9.8	I valori dei coefficienti γ calcolati con l'equazione dei flussi termici totali (RLM2).	158
9.9	I valori dei coefficienti $\gamma_{(24)}$ calcolati con l'equazione delle energie totali giornaliere (RLM2).	159
9.10	I valori dei coefficienti δ calcolati con l'equazione dei flussi termici totali e delle energie totali (RLM3).	161
10.1	Proprietà dei vetri e tenda della facciata CSa. Con si indica il vetro, con \sim la tenda.	171
10.2	Confronto tra dati misurati e modellati CSa, τ_s, t_n, \dot{q}	172

- 10.3 Confronto tra i risultati del modello MATS (sim1) e quelli di F .
Zanghirella (sim2) rispetto ai dati misurati CSc(A), Tn e \dot{q} 179

ITAC
Politecnico di Torino

Lorenza Bianco
Maggio 2014